

Н. Д. Торопцев

**ТРЕХФАЗНЫЙ
АСИНХРОННЫЙ
ДВИГАТЕЛЬ
В СХЕМЕ
ОДНОФАЗНОГО
ВКЛЮЧЕНИЯ
С КОНДЕНСАТОРОМ**

**ПРИЛОЖЕНИЕ К ЖУРНАЛУ
ЭНЕРГЕТИК**

Библиотечка электротехника

— приложение к журналу “Энергетик”

Основана в июне 1998 г.

Выпуск 7 (19)

Н. Д. Торопцев

ТРЕХФАЗНЫЙ АСИНХРОННЫЙ ДВИГАТЕЛЬ В СХЕМЕ ОДНОФАЗНОГО ВКЛЮЧЕНИЯ С КОНДЕНСАТОРОМ

Москва

НТФ “Энергопрогресс”, “Энергетик”

2000

Главный редактор журнала “Энергетик” А. Ф. ДЬЯКОВ

РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ

“Библиотечки электротехника”

В. А. Семенов (*председатель*), И. И. Батюк (*зам. председателя*),
Б. А. Алексеев, К. М. Антипов, Г. А. Безчастнов, А. Н. Жулев,
В. А. Забегалов, В. Х. Ишкин, Ф. Л. Коган, В. И. Кочкарев,
Н. В. Лисицын, Л. Г. Мамиконянц, Л. Ф. Плетнев, В. И. Пуляев,
Ю. В. Усачев, М. А. Шабад

Торошчев Н. Д.

Т59 Трехфазный асинхронный двигатель в схеме однофазного включения с конденсатором. М.: НТФ “Энергопрогресс”, 2000 — 72 с.; ил. [Библиотечка электротехника, приложение к журналу “Энергетик”, Вып. 7(19)].

Рассмотрены особенности применения трехфазного асинхронного двигателя в качестве конденсаторного, а также различные схемы включения. Даны простые соотношения для определения рабочей емкости конденсатора. Приведены основные технические данные трехфазных асинхронных двигателей серий RA и 4A (сельскохозяйственного назначения), а также конденсаторов различных типов.

Предназначена для электромонтеров, электротехников и электромехаников.

ПРЕДИСЛОВИЕ

В настоящей работе рассматриваются вопросы использования трехфазных асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором в качестве конденсаторных мощностью от нескольких ватт до 1,5 кВт.

Характерными особенностями таких двигателей являются: питание от двухпроводной сети, причем в частном случае электрической тяги поездов вторым проводом служит заземленный рельс;

высокие значения коэффициента мощности;

возможность осуществления режима преобразователя числа фаз, при котором от системы двухпроводная сеть — конденсаторный двигатель получают питание потребители трехфазного тока.

К областям применения асинхронных конденсаторных двигателей с тремя статорными обмотками относятся преимущественно различные машины и механизмы сельскохозяйственного назначения, ручной электроинструмент, вентиляторы, насосы и т.д.

В брошюре приведены примеры определения рабочей и пусковой емкостей конденсаторов, рабочего напряжения на конденсаторах при различных схемах включения, сделано сопоставление металлобумажных конденсаторов и пленочных конденсаторов по массогабаритным показателям, даны простые соотношения связи между токами и напряжениями конденсаторных двигателей.

Пожелания и замечания просьба направлять по адресу:

109280, Москва, ул. Автозаводская, 14/23.

Редакция журнала “Энергетик”.

Автор

1. Асинхронный двигатель трехфазного тока. Основные технические данные

Широкое распространение в различных отраслях народного хозяйства получили асинхронные двигатели трехфазного тока с короткозамкнутым ротором. Они не имеют скользящих контактов, просты по устройству и обслуживанию. Двигатель с короткозамкнутым ротором в разобранном виде показан на рис. 1. Основными его частями являются статор и ротор. Сердечники статора и ротора набирают из листов электротехнической стали.

В пазах сердечника статора укладывают и закрепляют трехфазную обмотку. В зависимости от напряжения питающей сети и данных двигателя ее соединяют звездой или треугольником. Выводы обмоток статора маркируют, благодаря чему облегчается сборка нужной схемы соединения.

В соответствии с ГОСТ приняты следующие обозначения выводов обмоток отдельных фаз: соответственно начало и конец

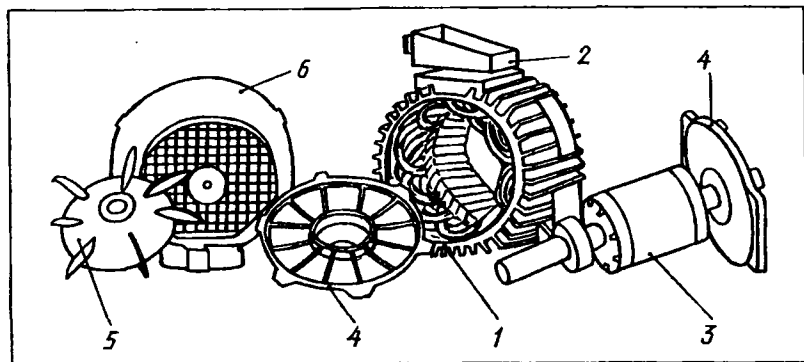


Рис. 1. Асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором в разобранном виде:
1 — статор; 2 — клеммная коробка; 3 — ротор; 4 — подшипниковые щиты;
5 — вентилятор; 6 — кожух вентилятора

первой фазы *С1* и *С4*, второй — *С2* и *С5* и третьей — *С3* и *С6* (рис. 2). Расположение выводов на коробке контактных зажимов двигателя должно удовлетворять требованию простоты соединения обмоток по любой схеме. Обмотку ротора от его сердечника не изолируют. Ее вместе с вентиляционными лопатками выполняют литой из алюминия или его сплавов. Стержни обмотки и накопотно замыкающие их кольца образуют так называемую беличью клетку.

Асинхронные короткозамкнутые двигатели по способу охлаждения и степени защиты персонала от соприкосновения с токоведущими или вращающимися частями, а также самой машины от попадания в нее посторонних тел имеют два исполнения: закрытое обдуваемое (обозначение IP44) и защищенное (обозначение IP23).

Двигатели исполнения IP44 имеют аксиальную систему вентиляции. Воздух подается вентилятором и обдувает внешнюю обребренную поверхность станины.

Для двигателей IP23 характерна двусторонняя радиальная система вентиляции, которая осуществляется при помощи вентиляционных лопаток, расположенных на короткозамыкающих кольцах ротора.

Ярославским электромашиностроительным заводом разработаны и выпускаются серии асинхронных машин мощностью до 100 кВт — RA, A, AИР. Машины этих серий отвечают мировым стандартам и отличаются улучшенными технико-экономическими и энергетическими показателями.

Основные технические данные двигателей небольшой мощности серии RA приведены в табл. 1.

Двигатели серии RA выпускаются с градацией мощности и присоединительных размеров по стандартам DIN, серий A, AИР — по стандартам ГОСТ.

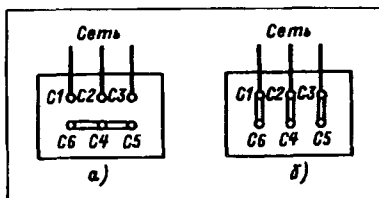


Рис. 2. Расположение выводов на щитке двигателя при соединении: а — звездой; б — треугольником

Таблица 1

Тип двигателя	Мощность, кВт	Частота вращения, об/мин	КПД, %	Коэффициент мощности
3000 об/мин (2 полюса)				
RA71A2	0,37	2830	67	0,80
RA71B2	0,55	2830	72	0,83
RA80A2	0,75	2820	74	0,83
RA80B2	1,1	2800	77	0,86
RA90S2	1,5	2835	79	0,87
RA90L2	2,2	2820	82	0,87
RA100L2	3,0	2835	82	0,86
1500 об/мин (4 полюса)				
RA71A4	0,25	1380	66	0,74
RA71B4	0,37	1380	67	0,72
RA80A4	0,55	1400	72	0,80
RA80B4	0,75	1400	75	0,75
RA90S4	1,1	1420	77	0,80
RA90L4	1,5	1420	78,5	0,80
RA100LA4	2,2	1390	78	0,82
RA100LB4	3,0	1395	78	0,80
1000 об/мин (6 полюсов)				
RA71A6	0,18	835	56	0,73
RA71B6	0,25	860	58	0,73
RA80A6	0,37	910	64	0,72
RA80AB6	0,55	915	67	0,70
RA90S6	0,75	930	71	0,70
RA90L6	1,1	930	72	0,72
RA100L6	1,5	925	72	0,71
RA112M6	2,2	960	79	0,75
RA132S6	3,0	960	83	0,79

В обозначениях типа двигателя:

А — асинхронный; 71 — 315 — высота оси вращения; А, В — обозначения длины сердечника (первая длина — А, вторая длина — В); S, L, M — установочные размеры по длине сердечника; 2, 4, 6, 8 — числа полюсов.

Пример 1. RA80A2 — двигатель серии RA, асинхронный, высота оси вращения 80 мм, сердечник первой длины, двухполюсный.

Трехфазный ток, проходя по обмотке статора, создает вращающееся магнитное поле. Частота вращения поля n_1 называется синхронной. Она зависит от частоты f_1 питающего напряжения и числа пар полюсов p машины:

$$n_1 = \frac{60 f_1}{p} \quad (1)$$

и при $f_1 = 50$ Гц принимает значения: 3000 об/мин ($p = 1$), 1500 об/мин ($p = 2$), 1000 об/мин ($p = 3$) и т.д.

Для частоты напряжения сети будем иметь:

$$f_1 = \frac{p n_1}{60}.$$

Ротор асинхронного двигателя, вращаясь в направлении поля, развивает частоту вращения, несколько меньшую, чем синхронная, называемую асинхронной. Отставание ротора характеризуется скольжением. Если частоту вращения ротора обозначить через n_2 , то соотношение для скольжения примет вид

$$s = \frac{n_1 - n_2}{n_1}, \quad (2)$$

или, в %,

$$s = \frac{n_1 - n_2}{n_1} 100.$$

Из (2) следует, что скольжение асинхронного двигателя изменяется от единицы (при пуске, когда $n_2 = 0$) до нуля (при синхронной частоте вращения, т.е. когда $n_2 = n_1$). Заметим, что точного равенства частоты вращения поля и ротора в двигательном режиме не достигается. Однако отставание ротора на холостом ходу машины так мало, что им можно пренебречь. Значения скольжений для малых двигателей, указанных в табл. 1, при полной нагрузке двигателя обычно составляют 4 – 6 %.

Выражение для частоты вращения ротора можно получить из соотношения (2):

$$n_2 = n_1(1 - s)$$

или

$$n_2 = \frac{60 f_1}{p} (1 - s).$$

Заметим, что числитель правой части равенства (2) имеет определенный физический смысл. Разность частоты вращения поля и ротора представляет собой относительную частоту вращения, т.е. частоту вращения поля относительно ротора n_s , или частоту скольжения.

Пример 2. Известны $n_1 = 1000$ об/мин, $s = 4$ %. Вычислить частоту вращения ротора и относительную частоту вращения.

Имеем: $n_2 = 1000(1 - 0,04) = 960$ об/мин; $n_s = n_1 - n_2 = 1000 - 960 = 40$ об/мин.

Частота ЭДС и токов, наводимых в обмотке ротора вращающимся магнитным полем, определяется частотой скольжения:

$$f_2 = \frac{pn_s}{60}.$$

Путем несложных преобразований это выражение приводится к виду:

$$f_2 = \frac{p(n_1 - n_2)}{60} \cdot \frac{n_1}{n_1} = \frac{pn_1}{60} \cdot \frac{n_1 - n_2}{n_1} = f_1 s,$$

т.е. частота ЭДС и токов ротора при условии $f_1 = \text{const}$ пропорциональна скольжению.

Пример 3. Найти частоту тока ротора для предыдущего примера.

Имеем: $f_2 = f_1 s = 50 \cdot 0,04 = 2$ Гц.

Развиваемая двигателем мощность в пределах нормальных нагрузок пропорциональна скольжению. Поэтому о нагрузке машины можно судить по скольжению.

Использование мощности двигателя в процессе его эксплуатации может быть различным. Коэффициент использования мощности

$$k_{\text{и}} = P_2 / P_{\text{ном}}, \quad (3)$$

где P_2 — полезная мощность при произвольной нагрузке; $P_{\text{ном}}$ — номинальная мощность, т.е. полезная мощность, на которую рассчитана электрическая машина.

Номинальной мощности соответствует номинальное напряжение. Двигатель потребляет при этом номинальный ток, имея номинальные значения частоты вращения, мощности на валу, КПД и $\cos \varphi$.

Назначение двигателя состоит в преобразовании электрической энергии в механическую. В процессе преобразования возникают потери. Они представляют ту часть активной мощности, которая расходуется на нагревание обмоток, стали сердечника статора и преодоление сил трения.

Отношение полезной мощности P_2 , развиваемой двигателем на валу, к активной мощности P_1 , потребляемой им из сети, называется коэффициентом полезного действия:

$$\eta = P_2 / P_1. \quad (4)$$

Кроме активной, двигатель потребляет реактивную намагничивающую мощность, необходимую для образования магнитного потока. Таким образом, полная мощность двигателя S состоит из активной и реактивной составляющих:

$$S = \sqrt{P_1^2 + Q^2}, \quad (5)$$

где Q — реактивная мощность двигателя.

Об относительном значении преобразованной мощности судят по коэффициенту мощности. Чем лучше используется мощность машины, тем выше коэффициент мощности. Для вычисления его достаточно активную мощность P_1 разделить на полную:

$$\cos \varphi = \frac{P_1}{S} = \frac{P_1}{3UI}, \quad (6)$$

где U , I — фазные значения напряжения и тока.

Пример 4. На щитке трехфазного асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором имеются следующие обозначения: $\Delta/\underline{\Delta}$, 220/380 В, 10,5/6,1 А, 2,8 кВт, 50 Гц, 2880 об/мин, КПД 81,5 %, $\cos \varphi = 0,86$.

Из рассмотрения этих данных заключаем: номинальное напряжение фазы 220 В, номинальный фазный ток 6,1 А, полезная

мощность $P_2 = 2,8$ кВт, число пар полюсов $p = 1$. Так как синхронная частота вращения

$$n_1 = \frac{60 f_1}{p}$$

(в данном случае она равна 3000 об/мин), то скольжение при номинальной нагрузке составит:

$$s_{\text{ном}} = \frac{3000 - 2880}{3000} 100 = 4 \, \%.$$

Полная мощность двигателя при номинальной нагрузке

$$S_{\text{ном}} = 3 U_{\text{ном}} I_{\text{ном}} = 3 \cdot 220 \cdot 6,1 \approx 4000 \text{ В} \cdot \text{А} = 4 \text{ кВ} \cdot \text{А}.$$

Активная мощность, потребляемая двигателем при номинальной нагрузке,

$$P_{1\text{ном}} = 3 U_{\text{ном}} I_{\text{ном}} \cos \varphi_{\text{ном}} = 3 \cdot 220 \cdot 6,1 \cdot 0,86 = 3,44 \text{ кВт}.$$

Потери в двигателе при номинальной нагрузке

$$\Sigma \Delta P_{\text{ном}} = P_{1\text{ном}} - P_2 = 3,44 - 2,8 = 0,64 \text{ кВт}.$$

С использованием данных табл. 1 построены кривые зависимости коэффициента мощности двигателей от их номинальной мощности (рис. 3).

Кривая 1 соответствует синхронной частоте вращения 3000 об/мин, 2 — 1500 об/мин и 3 — 1000 об/мин. Как видно, коэффициент мощности асинхронного двигателя зависит от номинальной мощности и синхронной частоты вращения.

С увеличением мощности при постоянстве синхронной частоты вращения ($n_1 = \text{const}$) уменьшается относительное значение воздушного зазора. Благодаря этому относительная реактивная намагничивающая мощность также уменьшается,

а коэффициент мощности возрастает. К такому же результату приводит увеличение синхронной частоты вращения при постоянстве номинальной мощности двигателя. Двигатели с большими частотами вращения имеют меньшие габариты,

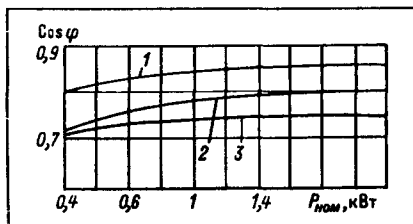


Рис. 3. Кривые зависимости коэффициента мощности от номинальной мощности асинхронных двигателей при различных значениях синхронной частоты вращения

что обусловлено уменьшением вращающего момента, у них существенно уменьшается объем воздушного пространства между сердечниками статора и ротора.

Кривые зависимости удельной намагничивающей мощности двигателей от номинальной при $n_1 = \text{const}$ показаны на рис. 4. Из рассмотрения их следует, что удельная намагничивающая мощность тем меньше, чем больше номинальная мощность двигателя и выше синхронная частота вращения.

Переход от зависимостей, приведенных на рис. 3 к зависимостям на рис. 4 производится с использованием следующих соотношений:

$$P_{1\text{ном}} = \frac{P_{\text{ном}}}{\eta_{\text{ном}}}; \quad (7)$$

$$S_{\text{ном}} = \frac{P_{1\text{ном}}}{\cos \varphi_{\text{ном}}}; \quad (8)$$

$$Q_{\text{ном}} = S_{\text{ном}} \sqrt{1 - \cos^2 \varphi_{\text{ном}}}, \quad (9)$$

где $S_{\text{ном}}$, $Q_{\text{ном}}$ — полная и реактивная мощности двигателя при номинальной нагрузке.

Из сопоставления рис. 3 и 4 нетрудно сделать заключение о влиянии коэффициента мощности на энергетические показатели двигателей и питающей их системы: у двигателей с повышенным коэффициентом мощности при данной номинальной нагрузке ($P_2 = P_{\text{ном}}$) реактивная намагничивающая мощность меньше. Это приводит к уменьшению полной мощности и, соответственно, к уменьшению тока, потребляемого из сети. В результате электрические потери в обмотках машины уменьшаются и ограничивается падение напряжения в проводах системы электроснабжения.

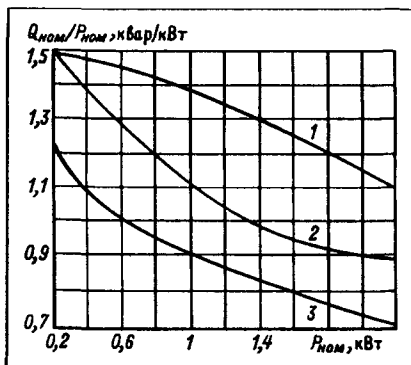


Рис. 4. Кривые зависимости удельной намагничивающей мощности от номинальной мощности асинхронных двигателей при различных значениях синхронной частоты вращения:
1 — $n_1 = 1000$ об/мин; 2 — $n_1 = 1500$ об/мин; 3 — $n_1 = 3000$ об/мин

2. Работа трехфазного асинхронного двигателя от сети однофазного тока. Способы пуска

Трехфазный асинхронный двигатель нормального исполнения может создавать вращающий момент без принятия специальных мер при питании от сети однофазного тока.

Предположим, что цепь одного из проводов работающего двигателя, присоединенного к трехфазной сети, разомкнулась (например, вследствие перегорания плавкой вставки предохранителя). Машина, оказавшаяся в однофазном режиме с последовательным или последовательно-параллельным соединением обмоток статора (рис. 5), будет продолжать вращаться, преодолевая момент сопротивления нагрузки. В первом случае одна фаза полностью теряет питание, во втором происходит уменьшение напряжения на каждой из двух фаз, соединенных последовательно. Частота вращения двигателя при этом в обоих случаях снижается, а скольжение возрастает.

Увеличение скольжения при неизменной нагрузке на валу сопровождается значительным возрастанием тока. Для предупреждения чрезмерного перегрева обмоток необходимо снизить нагрузку двигателя до 50 — 60 % номинальной.

Остановив трехфазный двигатель, работающий в однофазном режиме, легко убедиться в том, что пустить его в ход непосредственно включением в сеть однофазного тока невозможно. Это обусловлено характером магнитного поля статора, которое в однофазном режиме является пульсирующим.

Пульсирующее поле может быть представлено в виде двух полей, вращающихся с одной и той же синхронной скоростью в противоположные стороны.

Наибольшее значение (амплитуда) каждого из них равно половине амплитуды пульсирующего поля. Разложение пульсирующего поля на составляющие и его изменение во времени иллюстрируется простым графическим построением (рис. 6) с допущением, что обмотка, по которой проходит ток (показанная в виде одного витка), создает

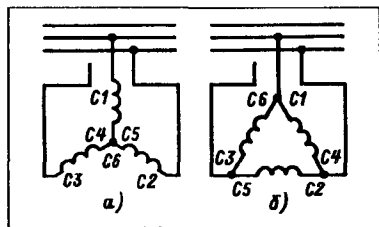


Рис. 5. Однофазное включение конденсаторного двигателя при соединении:

а — звездой; б — треугольником

в воздушном зазоре машины синусоидально распределенное магнитное поле (сплошная линия). Каждое из вращающихся полей (пунктирные линии 1 и 2) наводит в обмотке ротора ЭДС, под влиянием которых возникают токи. Взаимодействие вращающихся магнитных полей с токами ротора приводит к образованию вращающихся моментов, направленных в противоположные стороны.

Неподвижный ротор по отношению к этим полям находится в одинаковых условиях, поэтому вращающиеся моменты полностью уравниваются друг друга, этим и объясняется то обстоятельство, что трехфазный двигатель в однофазном режиме не имеет начального (пускового) момента.

Прямое поле, т.е. поле, направление вращения которого совпадает с направлением вращения ротора, наводит в его обмотке токи небольшой частоты (2 – 3 Гц при частоте напряжения сети 50 Гц). Обозначим момент, обусловленный прямым полем, через M_1 . Встречному (обратному) полю соответствует тормозной момент M_2 .

Токи, индуцированные в обмотке ротора встречным полем, при малых значениях скольжения имеют повышенную частоту (около 100 Гц) и, становясь поэтому почти чисто реактивными, оказывают размагничивающее действие. Ослабление встречного поля вызывает уменьшение тормозного момента M_2 .

Скольжение ротора по отношению к обратному полю равно

$$s_{\text{обр}} = \frac{n_1 - (-n_2)}{n_1} = \frac{n_1 + n_1(1-s)}{n_1} = 2 - s.$$

По этой причине токи ротора, наведенные обратным полем, имеют повышенную частоту

$$f_2 = f_1(2 - s).$$

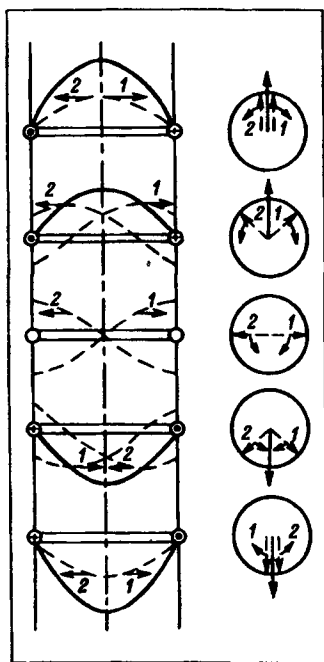


Рис. 6. Разложение пульсирующего магнитного поля на два вращающихся (1 и 2)

Каждое из вращающихся магнитных полей (прямое и обратное) является круговым. Пространственный вектор магнитодвижущей силы (МДС) кругового поля вращается с равномерной скоростью ($n_1 = \text{const}$), причем конец вектора перемещается по окружности. Диаграммы прямого и обратного магнитных полей с МДС $\vec{F}_1$ и $\vec{F}_2$ показаны на рис. 7, а, б.

Результирующее магнитное поле, обусловленное результирующей МДС $\vec{F}$, становится эллиптическим: конец вектора $\vec{F}$ при вращении описывает эллипс. Для эллиптического поля характерно непостоянство мгновенных частот вращения пространственного вектора результирующей МДС и, соответственно, магнитного поля машины. Это обстоятельство может стать причиной возникновения вибраций, особенно при малых моментах инерции ротора.

Построение диаграммы вращающейся МДС эллиптического поля приведено на рис. 7, в. Большая и малая оси эллипса определяются по соотношениям:

$$a = 2(\vec{F}_1 + \vec{F}_2); \quad b = 2(\vec{F}_1 - \vec{F}_2).$$

Эллиптическое поле, как следует из изложенного, можно рассматривать образованным в результате наложения двух круговых полей — прямого и обратного.

Результирующий момент однофазного двигателя равен разности моментов от прямого и обратного полей:

$$M = M_1 - M_2. \quad (10)$$

Наличие тормозного момента приводит к ухудшению характеристик двигателя в однофазном режиме: по сравнению с трехфазным двигатель имеет меньшие значения КПД и коэффици-

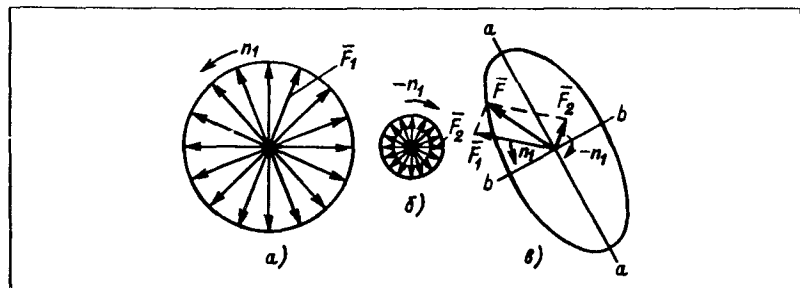


Рис. 7. Диаграммы вращающихся магнитных полей: а — прямого кругового; б — обратного кругового; в — эллиптического

ента мощности. Уменьшение КПД связано с возрастанием потерь, обусловленных появлением обратного поля. Снижение коэффициента мощности объясняется увеличением намагничивающего тока.

Как уже отмечалось, существенным недостатком трехфазного двигателя при однофазном включении является отсутствие пускового момента. Двигатели малой мощности можно пустить в ход "от руки", но этот способ неприменим для более мощных приводов. Поэтому задача непосредственного пуска трехфазного двигателя от однофазной сети имеет важное значение. Одно из возможных ее решений рассматривается в настоящей книге. Идея его состоит в образовании в воздушном зазоре машины вращающегося магнитного поля — эллиптического или кругового.

В эллиптическом поле кроме вращающегося момента M_1 возникает тормозной момент M_2 . В круговом поле тормозной момент отсутствует.

Для получения кругового вращающегося поля должны быть соблюдены определенные условия. При наличии двух статорных обмоток магнитное поле становится круговым, если их МДС, равные по значению, сдвинуты в пространстве на 90° (электрических) и во времени на четверть периода. Заметим, что под МДС понимают произведение тока обмотки на число ее витков (эффektivных). Ось МДС всегда совпадает с осью обмотки.

Рассмотрим схему включения асинхронного трехфазного двигателя в однофазную сеть (рис. 8, а). Одна обмотка статора образована фазой $C1 - C4$, другая состоит из двух фаз, соединенных последовательно: $C2 - C5$ и $C3 - C6$. Назовем первую обмотку

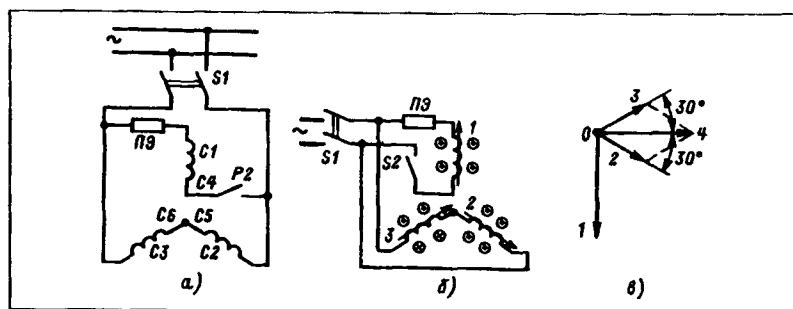


Рис. 8. Образование пространственного угла сдвига между осями главной и пусковой обмоток однофазного двигателя

пусковой, а вторую главной. Стрелками 1—3 (рис. 8, б) для некоторого момента времени условно показаны направления и значения пульсирующих МДС отдельных фаз двигателя. Ось МДС главной обмотки (стрелка 4) находят по правилу параллелограмма (рис. 8, в). Как видно, ось МДС главной фазы оказывается сдвинутой относительно осей МДС статорных обмоток С2—С5 и С3—С6 на 30° . При этом между осями МДС главной и пусковой обмоток создается пространственный сдвиг, равный 90° . В случае соединения обмоток двигателя треугольником достигается тот же результат.

Для получения в р е м е н н о г о сдвига магнитодвижущих сил, создаваемых токами главной и пусковой обмоток, в цепь пусковой обмотки включают активное сопротивление, индуктивное сопротивление или конденсатор. В первом и втором случаях создается эллиптическое вращающееся магнитное поле, так как сдвиг между токами обмоток во времени получается значительно меньше четверти периода. К достоинству этих способов пуска относятся простота и относительно невысокая стоимость пусковых элементов.

Если в качестве фазосдвигающего элемента использовать конденсатор, то можно получить вращающееся магнитное поле, близкое к круговому, а в некоторых случаях и круговое.

Пуск двигателя в ход производится следующим образом. При замкнутом рубильнике S2 (рис. 8, б) включается рубильник S1. По достижении частоты вращения, близкой к синхронной, цепь пусковой обмотки с пусковым элементом ПЭ размыкается вручную или автоматически, например с помощью центробежного выключателя. Под напряжением сети на время работы остается только главная фаза.

Сравнение различных способов пуска показало, что пусковой ток для одного и того же значения вращающего момента получается наименьшим при пуске с использованием в качестве пускового элемента конденсатора. С уменьшением пускового тока уменьшаются колебания напряжения в линии, что приводит к улучшению условий пуска вследствие известной пропорциональности между вращающим моментом асинхронного двигателя и квадратом приложенного напряжения.

Для одинаковых пусковых токов начальный вращающий момент двигателя с конденсатором в цепи пусковой обмотки значительно превосходит момент, получаемый при включении активного сопротивления или индуктивности.

3. Конденсаторный двигатель

Выше указывалось, что пусковые характеристики при однофазном включении трехфазного двигателя становятся наиболее благоприятными, когда в качестве пускового элемента используется конденсатор. Для улучшения рабочих характеристик конденсатор определенной емкости оставляют включенным на весь рабочий период.

Асинхронный двигатель, работающий от сети однофазного тока, с конденсатором в его цепи условимся называть конденсаторным.

По сравнению со схемой однофазного включения (см. рис. 5), конденсаторный двигатель развивает большую полезную мощность. Ее значение достигает 65 — 85 % номинальной мощности, указанной на шитке. Конденсаторный двигатель как асинхронный короткозамкнутый очень прост по устройству и надежен в работе. Его питание осуществляется от двухпроводной сети.

Ценным свойством конденсаторного двигателя является высокий коэффициент мощности, который может приобретать значения практически равные единице. В последнем случае двигатель потребляет из сети ток, пропорциональный только активной мощности, так как источником реактивной мощности для него являются конденсаторы.

Пусковая и рабочая емкости при данном напряжении сети и принятой схеме включения зависят от мощности двигателя. С увеличением мощности они возрастают. Начиная с некоторой мощности применение конденсаторных двигателей экономически уже не оправдывается из-за относительно высокой стоимости конденсаторов. Предельной мощностью конденсаторного двигателя общего назначения следует принять номинальную мощность 1,5 кВт, обозначенную на шитке.

Поясним сказанное на примере двигателя серии 4А в защищенном исполнении с синхронной частотой вращения 1500 об/мин. Стоимость конденсаторов типа КБГ-МН, образующих рабочую емкость, при мощности двигателя 1 кВт примерно равна стоимости двигателя, т.е. составляет приблизительно 100 %. Для мощностей 1,5 кВт и 10 кВт соответственно получаем 140 и 270 % стоимости двигателей.

Мощность от нескольких сотен ватт до 1,5 кВт имеет огромное число асинхронных трехфазных двигателей, применяемых в народном хозяйстве. В связи с освоением отечественными заводами технологии изготовления высокоэффективных конден-

Таблица 2

Номинальная мощность, кВт	Высота оси вращения, мм	Синхронная частота вращения, об/мин
0,09	50	3000
0,12	50	
0,18	56	
0,25	56	
0,37	63	
0,55	63	
0,75	71	
1,1	71	
1,5	80	1500
0,06	50	
0,09	50	
0,12	56	
0,18	56	
0,25	63	
0,37	63	
0,55	71	
0,75	71	
1,1	80	
1,5	80	1000
0,18	63	
0,25	63	
0,37	71	
0,55	71	
0,75	80	750
1,1	80	
0,25	71	
0,37	80	
0,55	80	
0,75	90	
1,1	90	
1,5	100	

саторов становится реальной возможностью широкого использования конденсаторных двигателей, особенно в условиях сельскохозяйственного производства.

Шкала номинальных мощностей электродвигателей* серии 4А сельскохозяйственного назначения приведена в табл. 2. Степень защиты электродвигателей серии 4А—IP44.

Для работы в средах повышенной влажности (птицеводческие помещения, животноводческие фермы) выпускаются электродвигатели серии 4А климатического исполнения У2, которые отличаются от двигателей основного исполнения влагостойкостью изоляции и защитными покрытиями.

Кроме сельскохозяйственных электроустановок конденсаторный двигатель может также найти применение в промышленности и быту для привода механизмов и машин небольшой мощности.

Отличительным элементом конденсаторного двигателя является конденсатор. Технические данные конденсаторов, пригодных для использования в цепи конденсаторного двигателя, приведены в § 4.

* Конденсаторные двигатели специального исполнения, например, электротяговые двигатели рудничных электровозов, могут иметь значительно большую мощность. В брошюре такие двигатели не рассматриваются.

4. Конденсаторы

Конденсаторы (ГОСТ 21415-75, 1282-79Е, 23232-78Е) в технике сильных токов применяются преимущественно для улучшения коэффициента мощности. Они необходимы также для пуска и работы конденсаторных двигателей.

Электрические свойства конденсаторов в значительной мере зависят от рода д и э л е к т р и к а , заключенного между обкладками. По этому признаку различают воздушные конденсаторы, бумажные, слюдяные, масляные, электролитические и т.д.

Каждый конденсатор рассчитан на определенное рабочее (номинальное) напряжение. Рабочим называется напряжение, при котором конденсатор может работать длительно. Номинальное напряжение и емкость указываются в паспортных данных конденсатора.

Конденсатор типа КБГ-МН предназначен для работы в цепях постоянного, переменного и пульсирующего токов в интервале температур от -60 до $+70^{\circ}\text{C}$ и выполняются постоянной емкости. Тип конденсатора КБГ-МН обозначает: конденсатор бумажный, герметический, в металлическом прямоугольном корпусе, нормальный.

Пример 5. Конденсатор типа КБГ-МН, 2 В, 1000 В, 4 мкФ $\pm 10\%$, т.е. конденсатор бумажный, с двумя изолированными выводами (2 В), емкостью 4 мкФ, с допустимым отклонением $\pm 10\%$.

Таблица 3

Рабочее напряжение постоянного тока, В	Номинальная емкость, мкФ	Размеры корпуса (длина $\times$ высота $\times$ ширина), мм
400	1	45 $\times$ 25 $\times$ 58
400	2	45 $\times$ 25 $\times$ 58
400	4	65 $\times$ 35 $\times$ 93
400	6	65 $\times$ 35 $\times$ 100
400	8	65 $\times$ 60 $\times$ 108
600	1	45 $\times$ 30 $\times$ 58
600	2	45 $\times$ 30 $\times$ 108
600	4	65 $\times$ 35 $\times$ 108
600	6	65 $\times$ 60 $\times$ 108
1000	1	45 $\times$ 30 $\times$ 78
1000	2	65 $\times$ 35 $\times$ 93
1000	4	65 $\times$ 60 $\times$ 108
1500	1	45 $\times$ 30 $\times$ 108
1500	2	65 $\times$ 60 $\times$ 108

Таблица 4

Номинальное напряжение постоянного тока, В	Допустимое напряжение, В, переменного тока для частоты			
	50 Гц		500 Гц	
	Емкость конденсатора, мкФ			
	До 2	4 – 10	До 2	4 – 10
400	250	200	125	75
600	300	250	150	100
1000	400	350	200	150
1500	500	—	250	—

Таблица 5

Рабочее напряжение постоянного тока, В	Номинальная емкость, мкФ	Размеры корпуса (длина × высота × ширина), мм
400	1	45 × 30 × 54
400	2	45 × 60 × 54
400	4	65 × 35 × 112
400	6	65 × 50 × 112
400	8	65 × 70 × 112
600	1	45 × 45 × 54
600	2	65 × 30 × 112
600	4	65 × 50 × 112
600	6	65 × 70 × 112
1000	1	45 × 80 × 54
1000	2	65 × 45 × 112
1000	4	65 × 80 × 112

Бумажные конденсаторы выдерживают в течение 4 ч удвоенное рабочее напряжение, в течение 10 с — утроенное рабочее напряжение.

По допустимому отклонению емкости от номинальной конденсаторы выпускаются трех классов точности:

Класс точности.....	I	II	III
Допустимое отклонение от номинального, %	±5	±10	±20

Основные технические данные конденсаторов приведены в табл. 3.

При работе конденсаторов в цепях переменного тока допустимое напряжение не должно превышать значений, указанных в табл. 4.

Пример 6. Допустимое напряжение конденсаторов типов КБГ-МН и БГТ (см. табл. 5) 6 мкФ, 600 В, используемых в сети переменного тока 50 Гц, составляет не 600, а 250 В.

Таблица 6

Рабочее напряжение переменного тока, В	Номинальная емкость, мкФ	Размеры корпуса (длина × высота × ширина), мм
250	1	46 × 11 × 50
250	2	46 × 16 × 50
250	4	46 × 26 × 50
250	10	46 × 56 × 50
500	1	46 × 21 × 50
500	2	46 × 41 × 50
500	4	69 × 34 × 115
750	1	46 × 51 × 50
750	2	69 × 34 × 115

Конденсаторы типа БГТ (бумажные герметические термостойкие) предназначены для работы в цепях постоянного, переменного и пульсирующего токов в интервале температур от -60 до $+100^{\circ}\text{C}$ и выполняются постоянной емкости. Конденсаторы типа БГТ по отклонению емкости от номинальной изготавливаются трех классов точности, как и конденсаторы типа КБГ-МН. В табл. 5 приведены их основные технические данные.

Конденсаторы типа МБГЧ предназначены для работы в цепях переменного или пульсирующего тока в интервале температур от -60 до $+70^{\circ}\text{C}$ и выполняются постоянной емкости в корпусах прямоугольной формы. Конденсаторы МБГЧ — металлобумажные (из металлизированной бумаги), герметизированные, частотные. По отклонению емкости от номинальной они изготавливаются II и III классов точности.

Основные технические данные конденсаторов приведены в табл. 6.

Конденсаторы типа ЭП (электролитические пусковые) предназначены для работы в цепях переменного тока в интервале температур от -40 до $+60^{\circ}\text{C}$ и выполняются постоянной емкости на номинальные рабочие напряжения 175 и 300 В по III классу точности. Конденсаторы допускают до 30 включений в 1 ч продолжительностью включения до 3 с.

Номинальные значения емкости при напряжении 175 В составляют 5, 10, 15, 20, 30, 50, 70 и 100 мкФ, а при напряжении 300 В — 1,5, 3, 5, 8, 10, 15, 20 и 30 мкФ.

Конденсаторы К78-17 полипропиленовые пленочные металлизированные предназначены для работы в цепях переменного и пульсирующего токов с частотой 50 Гц. По допустимому отклонению емкости от номинальной они выпускаются II и III классов точности. Интервал рабочих температур: от -25 до $+85^{\circ}\text{C}$.

Таблица 7

Емкость, мкФ	Рабочее напряжение при частоте 50 Гц			
	250 В		450 В	
	Размеры ($D \times H$, мм)	Масса, г, не более	Размеры ($D \times H$, мм)	Масса, г, не более
0,7	28 × 57	50	28 × 57	50
1	28 × 57	50	28 × 57	50
1,5	28 × 57	50	28 × 57	50
2	28 × 57	50	28 × 57	50
2,5	28 × 57	50	28 × 57	50
3	28 × 57	50	28 × 57	50
4	28 × 57	50	32 × 57	85
5	28 × 57	50	32 × 57	85
6	28 × 57	50	35 × 57	85
7	28 × 57	50	35 × 57	85
8	28 × 57	50	35 × 72	100
10	32 × 57	80	35 × 72	100
12	32 × 57	80	40 × 72	120
14	35 × 72	90	40 × 72	120
15	35 × 72	90	45 × 72	130
16	35 × 72	90	45 × 72	130
18	40 × 72	120	45 × 72	130
20	40 × 72	120	45 × 95	140
25	45 × 72	160	45 × 95	140
30	45 × 72	160	45 × 121	200
35	45 × 95	200	45 × 121	200
40	45 × 95	200	50 × 121	250
45	45 × 95	200	50 × 121	250
50	45 × 95	200	55 × 121	250

Конденсаторы К78-17 изготавливаются в цилиндрических корпусах (D — внешний диаметр, H — высота) на номинальные напряжения 250 и 450 В. По сравнению с рассмотренными выше (КБГ-МН, БГТ, МБГЧ) они имеют улучшенные массогабаритные показатели.

Пример 7. При рабочем напряжении 250 В и емкости 10 мкФ вес конденсатора типа К78-17 составляет 80 г. Вес такого же конденсатора типа МБГЧ — 274 г.

Основные технические данные конденсаторов К78-17 приведены в табл. 7.

5. Электрические схемы конденсаторного двигателя

Принципиальные схемы конденсаторного двигателя с тремя обмоткам на статоре приведены на рис. 9. Как и в случае трехфазного включения, обмотки статора могут быть соединены в звезду (рис. 9, а) или треугольник (рис. 9, б). Напряжение сети подводится к двум выводам двигателя, соответствующим началам двух фаз. Между одним из них и выводом, соответствующим началу третьей фазы, включаются конденсаторы 1 и 2. Последний необходим для увеличения пускового момента.

Пусковая емкость

$$C_{\text{п}} = C_{\text{р}} + C_{\text{о}}, \quad (11)$$

где $C_{\text{р}}$ — рабочая емкость; $C_{\text{о}}$ — отключаемая емкость.

После пуска двигателя конденсатор 2 отключается и в схеме остается только конденсатор 1 с рабочей емкостью. Выводы обмоток, к которым подведено напряжение сети, назовем входными. Очевидно, что возможны три комбинации образования входных выводов: $C1 - C2$, $C1 - C3$, $C3 - C2$. Положим, что использована первая из них. Тогда переключение на вторую комбинацию ($C1 - C3$) приведет к изменению направления вращения двигателя (реверсированию).

Как показывает анализ, в схемах включения на рис. 9, а и б устанавливается определенный порядок следования токов статорных обмоток двигателя, а именно $I_A - I_B - I_C$. Этому порядку соответствует также вполне определенное направление враще-

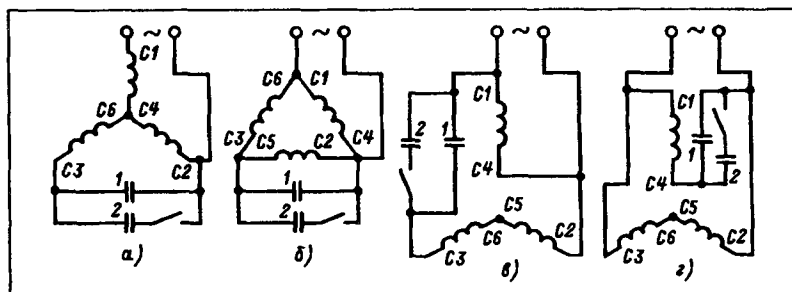


Рис. 9. Принципиальные электрические схемы конденсаторного двигателя с тремя статорными обмотками:

1 — рабочий конденсатор; 2 — отключаемый конденсатор

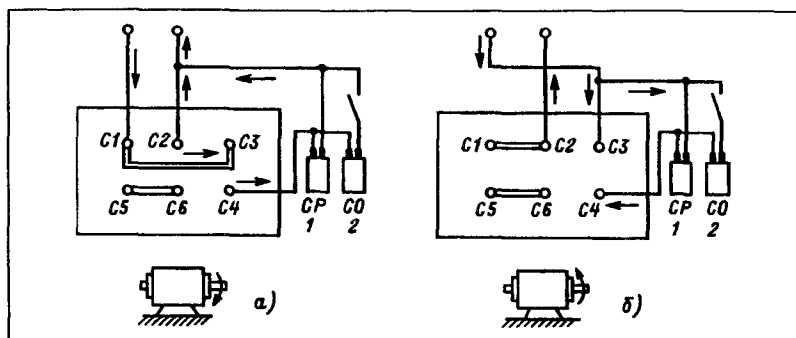


Рис. 10. Соединение выводов обмоток статора на щитке конденсаторного двигателя для схемы рис. 9, *г*

ния поля. Если произвести отмеченное переключение, то токи статорных обмоток будут следовать в обратном порядке ($I_A - I_C - I_B$). Направление вращения поля изменяется при этом на противоположное.

В других вариантах схем включения (рис. 9, *в* и *г*) из трех фаз исходного трехфазного двигателя образованы две обмотки. Одну из них составляют две фазы, соединенные последовательно. Обмотку, в цепи которой находится конденсатор, условимся называть конденсаторной фазой, другую обмотку, включенную на напряжение сети, — главной фазой.

Соединение выводов на коробке контактных зажимов щитка применительно к схеме включения, приведенной на рис. 9, *г*, для одного направления вращения показано на рис. 10, *а* и для другого — на рис. 10, *б*. Реверсирование двигателя достигается изменением порядка следования токов главной и конденсаторной фаз. В данном случае с этой целью производится переключение конденсаторной фазы (рис. 10).

В схеме включения конденсаторного двигателя используется следующая аппаратура управления и защиты: двухполюсный и однополюсный рубильники, реле и предохранители. Через двухполюсный рубильник к двигателю подводится питание от сети. Для включения и отключения пускового конденсатора применяются однополюсный рубильник, центробежное реле или специальное реле, токовая обмотка которого включается в цепь главной фазы. Предохранитель защищает двигатель от коротких замыканий.

В схеме конденсаторного двигателя, так же как и при трехфазном включении, можно использовать магнитный пускатель. В этом случае легко осуществляется дистанционное управление, защита от самозапуска (при сильном снижении напряжения сети двигатель отключается и самопроизвольно включиться не может), а также защита от перегрузок с помощью тепловых реле магнитного пускателя.

6. Определение рабочей и пусковой емкости

Номинальными напряжением и током конденсаторного двигателя условимся называть фазные значения этих величин, указанные в паспорте машины. Например, на щитке трехфазного асинхронного двигателя обозначено: 1 кВт, 127/220 В, 7,3/4,2 А, 1410 об/мин, КПД = 78,5 %, $\cos \varphi = 0,79$. В зависимости от напряжения сети обмотки статора при трехфазном включении соединяются в треугольник (при напряжении 127 В) либо в звезду (при напряжении 220 В). Соответственно потребляемый двигателем ток при полезной мощности 1 кВт составляет 7,3 А (соединение треугольником), или 4,2 А (соединение звездой). Однако независимо от схемы соединения фазными значениями напряжения и тока в приведенном примере остаются 127 В и 4,2 А. Их мы и будем считать номинальными при использовании двигателя в качестве конденсаторного.

Емкость и реактивное сопротивление конденсатора находятся в обратной зависимости. Чем меньше емкость, тем больше сопротивление. Изменение емкости сопровождается изменением тока. Из этого следует, что ток конденсаторной фазы (см. рис. 9, в и г) может оказаться меньше или больше номинального. В первом случае мощность двигателя недоиспользуется, во втором — возникает опасность недопустимого перегрева обмоток и повышения напряжений на отдельных участках схемы (на конденсаторной фазе, на конденсаторе). Особенно неблагоприятным оказывается явление резонанса напряжений, при котором ток конденсаторной фазы во много раз превышает номинальное значение, а возникающие перенапряжения представляют опасность для персонала и, кроме того, могут вызвать пробой изоляции обмотки или конденсатора.

В практике эксплуатации конденсаторного двигателя правильный выбор рабочей емкости имеет поэтому весьма большое значение.

Рабочая (постоянно включенная) емкость выбрана правильно, если фазные токи и напряжения при нагрузке становятся практически номинальными. Развиваемая полезная мощность при этом принимается за номинальную мощность конденсаторного двигателя. Удовлетворяющую отмеченным условиям рабочую емкость будем обозначать через $C_{p.ном}$. Определение рабочей емкости для любой произвольной нагрузки рассматривается ниже.

Следует отметить что полная симметрия напряжений и токов конденсаторного двигателя не достигается, особенно для схем на рис. 9, а и б. Тем не менее любой схеме включения соответствует одна вполне определенная емкость, при которой токи в обмотках нагруженного двигателя несущественно отличаются от номинальных.

Рабочая емкость пропорциональна мощности двигателя (номинальному току) и обратно пропорциональна напряжению. Применительно к рассмотренным схемам включения конденсаторного двигателя для частоты 50 Гц рабочая емкость приблизительно может быть определена по следующим соотношениям:

для схемы рис. 9, а

$$C_{p.ном} \approx 2800 \frac{I_{ном}}{U}; \quad (12)$$

для схемы рис. 9, б

$$C_{p.ном} \approx 4800 \frac{I_{ном}}{U}; \quad (13)$$

для схемы рис. 9, в

$$C_{p.ном} \approx 1600 \frac{I_{ном}}{U}; \quad (14)$$

для схемы рис. 9, г

$$C_{p.ном} \approx 2740 \frac{I_{ном}}{U}; \quad (15)$$

где $I_{ном}$ — номинальный ток, А; U — напряжение сети, В.

Таким образом, исходными данными, по которым определяется $C_{p.ном}$, являются номинальный ток двигателя и напряжение сети.

Пример 8. Определить рабочую емкость для двигателя 0,25 кВт, 127/220 В; 2,1/1,15 А, если двигатель включен по схеме, приведенной на рис. 9, а, а напряжение сети 220 В. Как видно, номинальный ток конденсаторного двигателя равен 1,15 А. На основании (12) находим:

$$C_{p.ном} \approx 2800 \frac{I_{ном}}{U} = 2800 \frac{1,15}{220} \approx 14,6 \text{ мкФ.}$$

Принимаем $C_{p.ном} = 15 \text{ мкФ}$.

При определении пусковой емкости исходят прежде всего из требований создания необходимого пускового вращающего момента. Если по условиям работы электропривода пуск двигателя происходит без нагрузки, то пусковая емкость обычно принимается равной рабочей. В этом случае схема включения упрощается.

Пуск под нагрузкой совершается при наличии в цепи двигателя и рабочей и отключаемой емкостей. Увеличение отключаемой емкости приводит к возрастанию пускового момента, и при некотором определенном ее значении момент достигает своей наибольшей величины. Дальнейшее увеличение емкости приводит к обратному результату: пусковой момент начинает уменьшаться.

Наибольший пусковой момент зависит не только от емкости, но и от схемы включения двигателя. При соединении обмоток звездой (рис. 9, а) или треугольником (рис. 9, б) пусковой момент не превосходит номинального при трехфазном включении. Для других схем (рис. 9, в и г) наибольший пусковой момент может в несколько раз превышать значение номинального момента, но его реализация сопряжена с появлением значительных перенапряжений в цепи конденсаторной фазы.

Однако на практике не возникает необходимость в создании такого большого момента при пуске.

Исходя из условия получения пускового момента, близкого к номинальному (при трехфазном включении), необходимо иметь пусковую емкость, примерное значение которой равно:

$$C_p \approx (2 + 3) C_{p.ном} \quad (16)$$

Отключаемые конденсаторы работают непродолжительное время (всего несколько секунд, или доли секунды за весь период включения). Это позволяет использовать при пуске наиболее дешевые электролитические конденсаторы типа ЭП, специально предназначенные для этой цели.

7. Напряжение на конденсаторе

Выше было рассмотрено определение рабочей и пусковой емкостей для различных схем включения конденсаторного двигателя. Не менее важным является выбор конденсаторов по напряжению. Действительно, установка конденсаторов с “запасом” по напряжению, т.е. с превышением номинального напряжения переменного тока над тем, под которым они находятся в схеме, приводит к недоиспользованию их реактивной мощности. Кроме того, стоимость конденсаторов с повышением номинального напряжения увеличивается. С другой стороны, эксплуатация конденсаторов под напряжением, превышающим номинальное, приводит к преждевременному выходу их из строя.

Условимся сравнивать напряжение на конденсаторе при номинальной нагрузке с напряжением сети.

Для первых двух схем включения конденсаторного двигателя (рис. 9, а и б) без существенной погрешности может быть принято равенство:

$$U_{\text{к.ном}} \approx U, \quad (17)$$

где $U_{\text{к.ном}}$ — напряжение на конденсаторе при номинальной нагрузке (действующее значение); U — напряжение сети.

Связь между напряжениями при включении двигателя по схеме, приведенной на рис. 9, з, выражается зависимостью

$$U_{\text{к.ном}} \approx 1,15U. \quad (18)$$

Из последнего выражения видно, что в данном случае напряжение на конденсаторе на 15 % выше напряжения сети.

Превышение напряжения конденсатора над напряжением сети для схемы, приведенной на рис. 9, в, оказывается еще бóльшим:

$$U_{\text{к.ном}} \approx 2U. \quad (19)$$

Напряжение на конденсаторе при постоянной рабочей емкости и данном напряжении сети не остается неизменным. Увеличиваясь с уменьшением нагрузки, оно достигает наибольшего значения при холостом ходе, составляя $(1,2 - 1,25)U_{\text{к.ном}}$.

При работе двигателя с нагрузкой, меньшей номинальной, рекомендуется пользоваться следующими соотношениями:
для схемы на рис. 9, а и б

$$U_{\text{к.раб}} \approx 1,15 U; \quad (20)$$

для схемы на рис. 9, г

$$U_{\text{к.раб}} \approx 1,3 U; \quad (21)$$

для схемы на рис. 9, в

$$U_{\text{к.раб}} \approx 2,2 U, \quad (22)$$

где $U_{\text{к.раб}}$ — расчетное напряжение конденсатора.

Конденсатор выбран правильно, если его номинальное напряжение переменного тока равно расчетному или несколько больше его.

Пример 9. Двигатель мощностью 1 кВт, 127/220 В включен по схеме, приведенной на рис. 9, г. Напряжение сети 220 В, рабочая емкость 52 мкФ состоит из конденсаторов типа КБГ-МН по 2 мкФ в каждом.

Требуется определить рабочее напряжение конденсаторов.

Расчетное напряжение $U_{\text{к.раб}}$ вычисляем по (21):

$$U_{\text{к.раб}} \approx 1,3 U = 1,3 \cdot 220 = 286 \text{ В.}$$

По табл. 4 для конденсаторов до 2 мкФ при частоте 50 Гц находим, что допустимому напряжению переменного тока 300 В (ближайшее большее к 286 В) соответствует номинальное напряжение постоянного тока 600 В. Итак, выбираем конденсаторы с рабочим напряжением 600 В.

Рабочую емкость комплектуем из 26 конденсаторов по 2 мкФ каждый.

8. Выбор схемы включения

Выбор схемы включения конденсаторного двигателя производится с учетом напряжения сети и данных двигателя по напряжению.

Схема выбрана правильно, если любая из обмоток статора трехфазного двигателя при номинальной нагрузке оказывается под напряжением, равным номинальному, или близким к нему. При этом имеется в виду, что установленная рабочая емкость определена по соотношению, соответствующему схеме.

Кроме согласования данных по напряжению, оцениваются особенности возможных схем. Заметим, что в отдельных конкретных случаях выбор вариантов схем может быть ограничен.

Пример 10. Статорные обмотки двигателя электрорубанка 0,62 кВт, 220 В, 1,88 А соединены в звезду, причем нулевая точка недоступна. Очевидно, что как конденсаторный он может иметь только одну схему включения, изображенную на рис. 9, а. Источником питания для двигателя служит сеть однофазного тока напряжением 220 В.

Рассмотрим особенности конденсаторного двигателя, включенного по схеме, приведенной на рис. 9, а. Назовем обмотку $C1 - C4$ главной фазой, через которую проходит весь ток двигателя, обмотку $C3 - C6$, соединенную последовательно с конденсатором, — конденсаторной фазой и третью обмотку $C2 - C5$ — вспомогательной фазой.

Изменение токов этих фаз с изменением скольжения оказывается совершенно различным. Если ток главной фазы с уменьшением нагрузки (скольжения) уменьшается, то ток конденсаторной фазы, наоборот, возрастает, достигая наибольшего значения при холостом ходе.

Вспомогательная фаза при холостом ходе находится в генераторном режиме — ее активная мощность отрицательна. С возрастанием нагрузки она переходит в двигательный режим. При этом ток фазы, уменьшаясь, достигает некоторого минимального значения и затем начинает увеличиваться.

Активная мощность по фазам распределяется неравномерно. При номинальной нагрузке главная фаза развивает примерно такую же мощность, как конденсаторная и вспомогательная, взятые вместе. Равенства всех токов номинальному не достигает-

ся. Поэтому под номинальной будем иметь в виду такую нагрузку, при которой токи двух фаз равны номинальному, а ток третьей фазы составляет 70 — 85 % номинального. Это определение относится и к случаю соединения обмоток статора треугольником.

Характерными особенностями схемы являются относительно небольшие значения пускового момента и напряжения на конденсаторе.

В другой схеме включения (рис. 9, б) обмотки двигателя соединены в треугольник. По аналогии с предыдущей схемой здесь также можно различить главную, вспомогательную и конденсаторную фазы. Вспомогательной оказывается фаза $C1 - C4$, к которой подведено напряжение сети. Обмотка $C2 - C5$ с параллельно присоединенным конденсатором представляет собой конденсаторную фазу и третья обмотка $C3 - C6$ — главную фазу.

Пример 11. В § 6 для двигателя, соединенного в звезду, при напряжении сети 220 В была получена рабочая емкость $C_{p,ном} \approx 14,6$ мкф. Напряжение на конденсаторе в соответствии с (17) равно $U_{к,ном} \approx U = 220$ В.

При напряжении сети обмотки двигателя соединяются в треугольник по схеме рис. 9, б. Для нее в соответствии с (13)

$$C_{p,ном} \approx 4800 \frac{I_{ном}}{U} = 4800 \frac{1,15}{127} = 43,5 \text{ мкФ.}$$

Сравнивая емкости 43,5 и 14,6 мкФ, видим, что для схемы на рис. 9, б рабочая емкость увеличивается в 3 раза. Напряжение на конденсаторе определяется по (17):

$$U_{к,ном} \approx U = 127 \text{ В.}$$

Активная мощность между обмотками распределяется неравномерно. Наибольшую мощность при номинальной нагрузке развивают главная и вспомогательная фазы.

Относительно небольшой пусковой момент составляет одно из характерных свойств этой схемы. Особенности ее по сравнению с предыдущей состоят в том, что для одного и того же двигателя напряжение на конденсаторе уменьшается в $\sqrt{3}$ раз, а емкость рабочего конденсатора увеличивается в 3 раза.

Проведенное сравнение показывает, что первая схема (рис. 9, а) является предпочтительнее, так как ее технические и экономические показатели лучше: меньше емкость и габариты батареи конденсаторов, ниже стоимость ее установки. Однако, ее приме-

нение на всегда оказывается возможным. Если напряжение сети равно номинальному напряжению фазы, обмотки двигателя соединяются в треугольник (рис. 9, б) или как показано на рис. 9, в.

Обмотки статора трехфазного асинхронного двигателя в схемах на рис. 9, в и г образуют две фазы — главную и конденсаторную.

Ток главной фазы возрастает с нагрузкой, конденсаторной — уменьшается. Двигатель работает с номинальной нагрузкой, когда по обеим фазам протекает номинальный ток. При этом обратное магнитное поле становится несущественным, вследствие чего использование мощности двигателя улучшается.

Активные мощности главной и конденсаторной фаз, соответствующие номинальной нагрузке, примерно одинаковы. С уменьшением нагрузки происходит некоторое возрастание мощности конденсаторной фазы. Мощность главной фазы довольно резко уменьшается и на холостом ходу приобретает отрицательное значение: главная фаза переходит в режим асинхронного генератора с конденсаторным возбуждением, работающего параллельно с сетью. С появлением нагрузки на вал главная фаза переходит в двигательный режим.

Достоинством схем рис. 9, в и г по сравнению с рассмотренными выше является возможность получения значительного пускового момента. Сравним эти схемы.

Пусть питающая сеть однофазного тока, как это часто встречается на практике, имеет напряжение 220 В. Очевидно, что если двигатель выполнен на напряжения 220/380 В, он включается по схеме, приведенной на рис. 9, в, или по схеме на рис. 9, г, если номинальные напряжения двигателя 127/220 В.

Напряжение на конденсаторе при номинальной нагрузке составит: для схемы на рис. 9, в $U_{\text{к.ном}} \approx 2U = 2 \cdot 220 = 440$ В, а для схемы на рис. 9, г $U_{\text{к.ном}} \approx 1,5U = 1,5 \cdot 220 = 253$ В.

Между напряжениями на конденсаторе в том и другом случае имеется существенная разница. Повышение напряжения связано с некоторым увеличением стоимости конденсаторов и уменьшением безопасности обслуживания. Кроме того, вследствие возрастания индуктивного сопротивления цепи конденсаторной фазы при включении двигателя по схеме рис. 9, возникает опасность перенапряжения, особенно при пуске двигателя в ход.

Схема на рис. 9, г, выгодно отличаясь от предыдущей, заслуживает предпочтения.

Заметим, что двигатель на напряжения 127/220 В также может быть включен по схеме рис. 9, в, но на напряжение сети 127 В. Если же номинальные напряжения двигателя равны 220/380 В, а напряжение питающей сети — 220 В, то здесь вместо включения конденсаторного двигателя с двумя обмотками (рис. 9, в) следует выбрать схему с соединением фаз в треугольник, несмотря на увеличение емкости конденсаторов.

Пример 12. Имеются конденсаторы типа МБГЧ и ЭП. Двигатель 1 кВт, 220/380 В с номинальным током фазы 2,4 А включается на напряжение сети 220 В. Требуется определить значения рабочей и пусковой емкостей, а также расчетное напряжение на конденсаторах и напряжение при номинальной нагрузке.

Схема на рис. 9, б

Рабочая емкость по (13)

$$C_{p.ном} \approx 4800 \frac{I_{ном}}{U} = 4800 \frac{2,4}{220} = 52,5 \text{ мкФ.}$$

Номинальное напряжение на конденсаторе по (17)

$$U_{к.ном} \approx U = 220 \text{ В.}$$

Расчетное напряжение на конденсаторе по (20)

$$U_{к.раб} \approx 1,15 U = 1,15 \cdot 220 \approx 250 \text{ В.}$$

По табл. 6 выбираем 13 конденсаторов МБГЧ емкостью по 4 мкФ с рабочим напряжением 250 В.

Отключаемую емкость принимаем по (16) равной

$$C_o \approx 2 C_{p.ном} = 105 \text{ мкФ}$$

и выбираем для нее пять конденсаторов типа ЭП по 20 мкФ на 300 В.

Схема на рис. 9, в

Рабочая емкость по (14)

$$C_{p.ном} \approx 1600 \frac{I_{ном}}{U} = 1600 \frac{2,4}{220} \approx 18 \text{ мкФ.}$$

Номинальное напряжение на конденсаторе по (19)

$$U_{к.ном} \approx 2 U = 2 \cdot 220 = 440 \text{ В.}$$

Оно может быть найдено также умножением номинального тока на реактивное сопротивление конденсатора x_C :

$$U_{к.ном} = I_{ном} x_C = I_{ном} \frac{10^6}{\omega C},$$

где $\omega = 2\pi f$ — угловая частота переменного тока; C — емкость, мкФ; f — частота напряжения сети, Гц.

Произведя вычисления для частоты $f = 50$ Гц, получим:

$$U_{к.ном} = 2,4 \frac{10^6}{314 \cdot 18} = 425 \text{ В.}$$

Расхождение с данными, полученными по (19), составляет примерно 4 %, что для практических расчетов вполне допустимо.

Расчетное напряжение на конденсаторе по (22)

$$U_{к.раб} \approx 2,2 U = 2,2 \cdot 220 = 484 \text{ В.}$$

По табл. 6 выбираем девять конденсаторов МБГЧ по 2 мкФ на рабочее напряжение 500 В.

Для отключаемой емкости конденсаторы типа ЭП не подходят по напряжению. Поэтому отключаемую емкость составляем из конденсаторов типа МВГЧ, принимая ее равной

$$C_0 \approx 1,5 C_{р.ном} = 1,5 \cdot 18 = 27 \text{ мкФ.}$$

По табл. 6 выбираем семь конденсаторов по 4 мкФ на рабочее напряжение 500 В.

Приведенный пример подтверждает целесообразность включения конденсаторного двигателя при отмеченных условиях по схеме рис. 9, б.

Пример 13. Выбрать схему включения конденсаторного двигателя 0,6 кВт, 127/220 В с номинальным током фазы 2,5 А, если напряжение сети 127 В. Определить рабочую емкость и выбрать конденсаторы типа КБГ-МН.

Сопоставление приведенных данных по напряжению показывает, что включение двигателя возможно по схемам рис. 9, б или в. Произведем вычисления для обеих схем.

Схема на рис. 9, б

Рабочая емкость по (13)

$$C_{р.ном} \approx 4800 \frac{I_{ном}}{U} = 4800 \frac{2,5}{127} = 94 \text{ мкФ.}$$

Расчетное напряжение на конденсаторе по (20)

$$U_{к.раб} \approx 1,15 U = 1,5 \cdot 127 \approx 146 \text{ В.}$$

По табл. 4 для частоты 50 Гц выбираем конденсаторы емкостью от 4 до 10 мкФ с допустимым напряжением переменного тока 200 В, что соответствует номинальному напряжению постоянного тока 400 В, обозначенному на конденсаторах.

По табл. 3 для рабочего напряжения постоянного тока 400 В выбираем 16 конденсаторов по 6 мкФ.

Схема на рис. 9, в

Рабочая емкость по (14)

$$C_{p, \text{ном}} \approx 1600 \frac{I_{\text{ном}}}{U} = 1600 \frac{2,5}{127} = 32 \text{ мкФ.}$$

Расчетное напряжение на конденсаторе по (22)

$$U_{\text{к. раб}} \approx 2,2U = 2,2 \cdot 127 = 280 \text{ В.}$$

По табл. 4 для частоты 50 Гц выбираем конденсаторы емкостью 2 мкФ с допустимым напряжением переменного тока 300 В, что соответствует номинальному напряжению постоянного тока 600 В.

По табл. 3 для рабочего напряжения постоянного тока 600 В выбираем 16 конденсаторов емкостью по 2 мкФ.

При относительно невысоком напряжении на конденсаторах схема на рис. 9, в в данном конкретном случае отличается меньшими емкостью и стоимостью конденсаторов.

Аналогичным образом и синусоидально изменяющееся напряжение можно представить графически в виде вектора, вращающегося с угловой частотой ω . Векторы тока и напряжения, изображенные в соответствующих масштабах, можно совместить, т.е. показать в одной системе координат.

Совокупность векторов, изображающих синусоидально изменяющиеся функции времени, называется векторной диаграммой.

Между амплитудными и действующими значениями синусоидально изменяющихся токов и напряжений существует зависимость

$$I_{\text{max}} = \sqrt{2} I; \quad U_{\text{max}} = \sqrt{2} U,$$

где I , U — действующие значения тока и напряжения, т.е. значения, которые регистрируются приборами, включенными в цепь переменного тока.

Условимся в дальнейшем пользоваться действующими значениями синусоидальных величин.

Вращающиеся векторы тока и напряжения остаются неподвижными относительно друг друга, так как частоты вращения их равны, а направления вращения совпадают. Между ними в общем случае возникает сдвиг во времени, соответствующий фазовому углу φ . Угол сдвига векторов тока и напряжения зависит от характера нагрузки.

В цепи переменного тока различают: активное сопротивление r , индуктивное сопротивление x_L , емкостное сопротивление x_C . Независимо от числа и комбинаций этих сопротивлений в конкретной цепи их можно заменить одним эквивалентным или полным сопротивлением Z .

9. Графическое изображение синусоидальных величин

Величины, изменяющиеся во времени по синусоидальному закону, удобно изображать вращающимися направленными отрезками (векторами).

Примем, что вектор тока $\overline{OA}$ вращается как показано на рис. 11, с постоянной угловой частотой

$$\omega = \frac{2\pi}{T}, \quad (23)$$

где T — период, т.е. время поворота вектора на угол, равный 2π рад, а длина его в определенном масштабе равна амплитуде тока I_{max} .

Мгновенные значения тока i , отнесенные к любому произвольно взятому моменту времени t , будут определяться проекцией вектора на вертикальную ось.

Из рассмотрения графиков на рис. 11 нетрудно составить представление о характере кривой зависимости тока от времени. Огибающая мгновенных значений тока представляет собою синусоидальную кривую, уравнение которой записывается в виде:

$$i = I_{max} \sin(\omega t + \psi),$$

где ωt — угол поворота вектора за время t ; ψ — начальная фаза, соответствующая начальному положению вектора в момент времени $t = 0$.

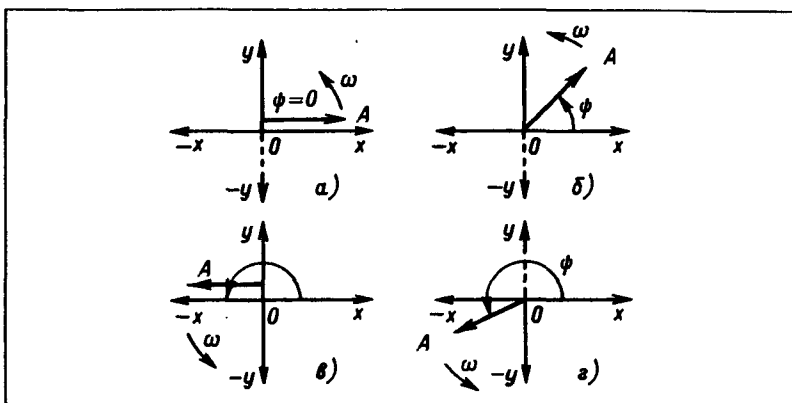


Рис. 11. Положение вращающегося вектора тока в различные моменты времени

В течение периода заканчивается полный цикл изменений тока. Во втором и последующих периодах эти изменения повторяются.

Из условных направлений токов и напряжений, показанных на рис. 12, следует, что ток совпадает по фазе с активным падением напряжения ($\varphi = 0$), т.е. с падением напряжения на активном сопротивлении, отстает от индуктивного падения напряжения

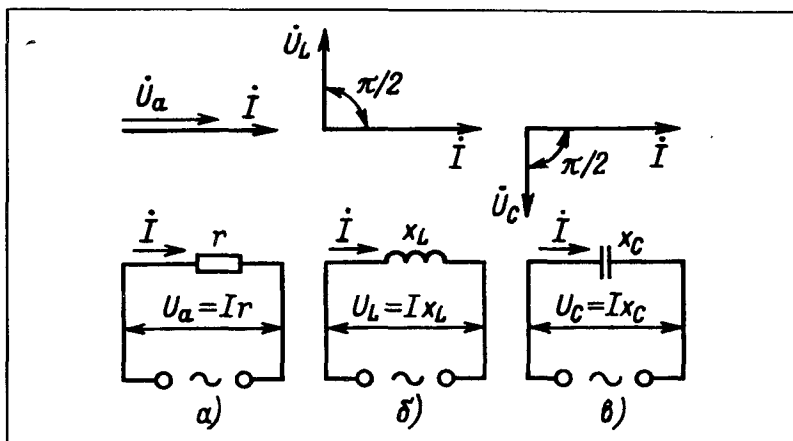


Рис. 12. Векторные диаграммы тока и напряжений, соответствующие схемам включения в цепь переменного тока активного (а), индуктивного (б) и емкостного (в) сопротивлений

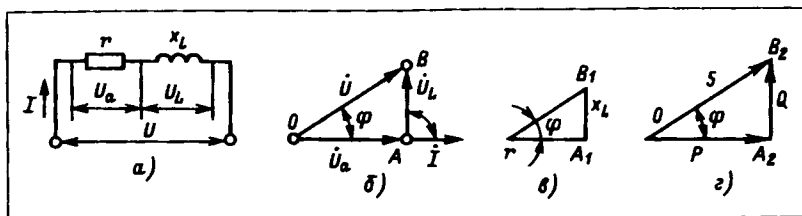


Рис. 13. Включение статорной обмотки двигателя на переменное напряжение: а — принципиальная схема; б — векторная диаграмма токов и напряжений; в — треугольник сопротивлений; г — треугольник мощностей

на угол $\varphi = \pi/2$ и опережает падение напряжения на конденсаторе на угол $\varphi = \pi/2$.

Пользуясь отмеченными правилами, нетрудно выполнить построение векторной диаграммы токов и напряжений для приемника, содержащего качественно различные сопротивления.

Представим обмотку двигателя переменного тока в виде электрической цепи, состоящей из активного и индуктивного сопротивлений, соединенных последовательно (рис. 13, а).

Активное сопротивление отражает процессы преобразования электроэнергии в двигателе, о которых говорилось выше. Наличие индуктивного сопротивления указывает на то, что кроме активной двигатель получает из сети реактивную мощность, необходимую для образования магнитного поля. Условные положительные направления токов и напряжений показаны на рис. 13, а. Векторная диаграмма тока и напряжений в обмотке двигателя показана на рис. 13, б. Методика ее построения следующая. Сначала откладывают в произвольном масштабе вектор тока, направление которого принято совпадающим с положительным направлением оси абсцисс. Затем, пользуясь масштабом напряжений, выбранным также произвольно, наносят вектор активного падения напряжения (отрезок OA), совпадающего по фазе с током. Далее из точки A проводят вектор индуктивного падения напряжения AB , опережающего ток по фазе на угол $\pi/2$.

Сложив геометрически векторы OA и AB , получают значение и направление вектора напряжения сети OB , приложенного к фазе двигателя.

10. Графики зависимостей токов и напряжений конденсаторного двигателя от нагрузки

Токи фаз в обмотках асинхронного трехфазного двигателя при симметричном трехфазном включении возрастают по мере увеличения нагрузки, а фазные напряжения остаются постоянными (предполагается, что питающая сеть обладает достаточно большой мощностью). При этом имеют место равенства

$$\begin{aligned} I_A &= I_B = I_C; \\ U_A &= U_B = U_C = \text{const}; \\ \cos \varphi_A &= \cos \varphi_B = \cos \varphi_C, \end{aligned}$$

где I_A, I_B, I_C — токи фаз обмоток; U_A, U_B, U_C — фазные напряжения.

Фазные напряжения сдвинуты относительно друг друга во времени на $1/3$ периода. Соответственно, на $1/3$ периода сдвинуты относительно друг друга токи обмоток разных фаз.

Фазовый угол сдвига φ между током и напряжением обмоток фаз зависит от нагрузки. С увеличением последней он уменьшается, а коэффициент мощности возрастает.

При включении двигателя в сеть однофазного тока в качестве конденсаторного симметрия токов и напряжений статорных обмоток нарушается. Мощность двигателя при этом недоиспользуется, а зависимости токов и напряжений от нагрузки приобретают различный характер.

Условимся считать, что при включении конденсаторного двигателя по любой из рассмотренных схем напряжение сети U и рабочая емкость C_p остаются постоянными. Токи, напряжения и сколь-

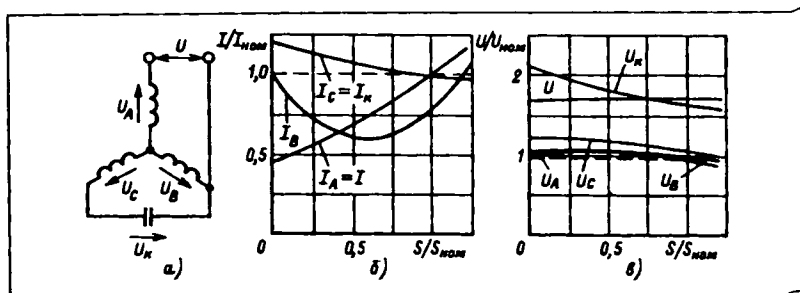


Рис. 14. Соединение обмоток статора конденсаторного двигателя звездой: а — принципиальная схема; б — графики зависимостей токов; в — графики зависимостей напряжений от скольжения при $C_p = C_{p,ном}$

жения выразим в относительных единицах, т.е. в долях номинальных величин. Зависимости токов конденсаторного двигателя от скольжения при соединении обмоток статора звездой (рис. 14, а), иллюстрируются кривыми на рис. 14, б.

Ток в обмотке фазы *А* с увеличением нагрузки возрастает, фазы *С* уменьшается, а фазы *В* изменяется неоднозначно, т.е. сначала уменьшается, затем, достигнув минимального значения, начинает возрастать. Заметим, что и для других схем включения конденсаторного двигателя с тремя обмотками на статоре характерна следующая особенность: фаза, ток которой с изменением нагрузки изменяется неоднозначно, в режиме холостого хода генерирует активную мощность.

Напряжение на конденсаторе, уменьшающееся с нагрузкой, соизмеримо с напряжением сети (рис. 14, в). Фазные напряжения неодинаковы.

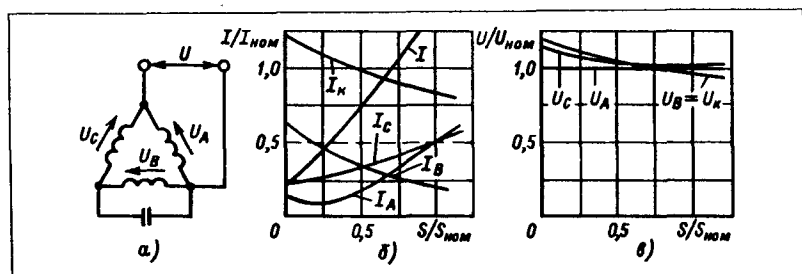


Рис. 15. Соединение обмоток статора конденсаторного двигателя треугольником: а — принципиальная схема; б — графики зависимости токов; в — графики зависимости напряжений от скольжения при $C_p = C_{p.\text{ном}}$

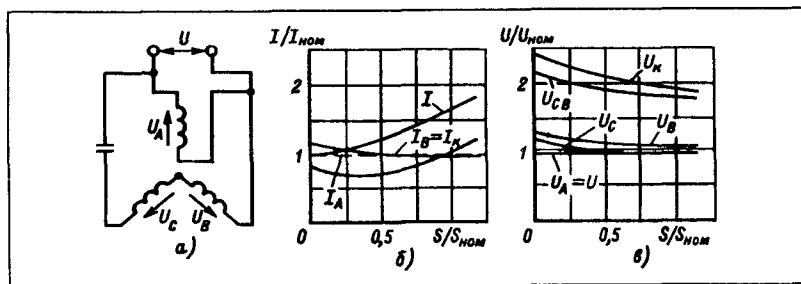


Рис. 16. Соединение двух статорных обмоток последовательно с конденсатором конденсаторного двигателя: а — принципиальная схема; б — графики зависимости токов; в — графики зависимости напряжений от скольжения при $C_p = C_{p.\text{ном}}$

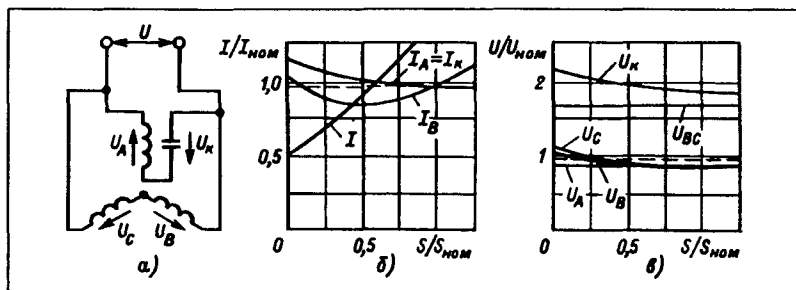


Рис. 17. Соединение одной статорной обмотки последовательно с конденсатором конденсаторного двигателя:

a — принципиальная схема; *б* — графики зависимости токов; *в* — графики зависимости напряжений от скольжения при $C_p = C_{p.ном}$

При соединении обмоток двигателя в треугольник (рис. 15, *a*) зависимости токов от скольжения аналогичны кривым на рис. 14, *б*. Неоднозначное изменение тока относится в данном случае к фазе *A*.

Ток конденсатора I_k существенно превышает номинальный ток фазы, так как для схемы на рис. 15, *a* характерна значительная емкость $C_{p.ном}$. Фазные напряжения U_B и U_C в режиме номинальной нагрузки практически равны напряжению первой фазы (рис. 15, *в*).

Графики токов двигателя с конденсатором, включенным в цепь двух статорных обмоток (рис. 16, *a*), приведены на рис. 16, *б*. Ток конденсаторной фазы с увеличением скольжения уменьшается, главной фазы — изменяется неоднозначно.

Напряжение на конденсаторе (рис. 16, *в*) значительно превышает напряжение сети, с чем необходимо считаться на практике. Напряжения статорных обмоток в режиме номинальной нагрузки существенно отличаются по значению.

При включении двигателя по схеме рис. 17, *a* зависимости токов от скольжения (рис. 17, *б*) аналогичны графикам на рис. 16, *б*. Напряжение на конденсаторе немного выше напряжения сети (рис. 17, *в*). Статорные обмотки исходного трехфазного двигателя находятся под напряжениями, близкими к номинальному. Ток конденсаторной фазы независимо от схемы включения двигателя имеет один и тот же характер — он уменьшается с увеличением нагрузки. Поясним сказанное.

Конденсаторная фаза, например фаза *A* (рис. 17, *a*) может быть представлена в виде электрической цепи, состоящей из последовательно соединенных активного r , индуктивного x_L и емкостного x_C сопротивлений. Реактивные сопротивления фазы связаны нера-

венством $x_C > x_L$, отвечающим необходимому сдвигу во времени (приблизительно на четверть периода) токов главной и конденсаторной фаз.

Построим по правилам, изложенным выше (см. § 9), прямоугольный треугольник напряжений для цепи конденсаторной фазы с учетом приведенного неравенства реактивных сопротивлений. Катетами его будут $I_A r$ и $I_A (x_C - x_L)$, а гипотенузой $I_A Z$. Очевидно, что разделив эти падения напряжений на ток фазы I_A , получим треугольник сопротивлений, подобный исходному, причем полное сопротивление цепи конденсаторной фазы равно

$$Z = \sqrt{r^2 + (x_C - x_L)^2},$$

где $x_C = \frac{1}{\omega C_p} = \text{const}$ ($C_p = \text{const}$).

Сопротивления r и x_L зависят от режима работы (скольжения), т.е. являются переменными. Определяющее влияние на характер изменения сопротивления Z оказывает индуктивное сопротивление x_L . Последнее с увеличением нагрузки уменьшается вследствие насыщения магнитной цепи машины. В результате полное сопротивление цепи конденсаторной фазы возрастает, а ток фазы при условии $U = \text{const}$ — уменьшается.

11. Расчетное определение рабочей емкости

Рассмотрим расчетное определение рабочей емкости применительно к схеме включения конденсаторного двигателя, показанной на рис. 17, а, полагая, что в воздушном зазоре машины создается круговое вращающееся магнитное поле. При этом МДС главной и конденсаторной фаз, сдвинутые относительно друг друга в пространстве на 90° и во времени на четверть периода, равны:

$$I_{г.ф} w_{г.ф} = I_{к.ф} w_{к.ф},$$

где $w_{г.ф}$ — число витков главной фазы; $w_{к.ф}$ — число витков конденсаторной фазы, равное числу витков статорной обмотки исходного трехфазного двигателя.

Из схемы, приведенной на рис. 17, а, следует очевидное равенство

$$w_{к.ф} = w_A.$$

Установим соотношение между числами витков главной и конденсаторной фаз. Обратимся к рис. 17, в, из которого видно, что намагничивающее действие тока $I_{г.ф.}$, проходящего по двум статорным обмоткам двигателя, соединенным последовательно, эквивалентно намагничивающему действию одной обмотки (главной фазы) с числом витков $w_{г.ф.}$, по которой проходит тот же ток, причем ось главной фазы сдвинута в пространстве относительно оси конденсаторной фазы на 90° .

Следовательно,

$$w_{г.ф.} = w_B \cos 30^\circ + w_C \cos 30^\circ = \sqrt{3} w_{к.ф.},$$

где $w_B = w_C = w_A = w_{к.ф.}$.

Из условия равенства МДС, приведенного выше, находим зависимость между токами обмоток:

$$I_{г.ф.} = \frac{1}{\sqrt{3}} I_{к.ф.}$$

Примем, что напряжения и токи двигателя образуют симметричные двухфазные системы. Тогда треугольник напряжений статорных цепей становится прямоугольным с углом $(\widehat{U_k, U}) = 30^\circ$. Из него получаем:

$$U_k = \frac{U_{г.ф.}}{\cos 30^\circ} = \frac{2}{\sqrt{3}} U_{г.ф.} = \frac{2}{\sqrt{3}} U;$$

$$U_{к.ф.} = U_k \sin 30^\circ = \frac{1}{\sqrt{3}} U_{г.ф.} = \frac{1}{\sqrt{3}} U.$$

Полные мощности главной и конденсаторной фаз равны:

$$U_{г.ф.} I_{г.ф.} = U_{к.ф.} I_{к.ф.},$$

в чем легко убедиться по приведенным выше уравнениям связи между токами и напряжениями фаз.

Из последнего выражения вытекает, что полная мощность, потребляемая двигателем из сети, может быть представлена в виде соотношения

$$S = 2 U_{г.ф.} I_{г.ф.} = 2 U I_{г.ф.}$$

Реактивная мощность конденсаторов при круговом вращающемся поле равна полной мощности двигателя:

$$Q_k = U_k I_{к.ф.} = \frac{2}{\sqrt{3}} U \sqrt{3} I_{г.ф.} = 2 U I_{г.ф.}$$

С другой стороны,

$$Q_k = I_{к.ф}^2 x_C = \frac{I_{к.ф}^2}{\omega C}.$$

Приравнивая правые части последних выражений и учитывая зависимость между токами главной и конденсаторной фаз, находим емкость конденсаторов при круговом вращающемся поле в фарадах

$$C = \frac{\sqrt{3}}{2} \frac{I_{к.ф}}{\omega U},$$

или в микрофарадах

$$C = \frac{\sqrt{3}}{2} \frac{I_{к.ф} \cdot 10^6}{\omega U}. \quad (24)$$

Из полученных соотношений следует, что при номинальном токе главной фазы $I_{г.ф} = I_{ном}$ по условию образования кругового вращающегося поля в цепь конденсаторной фазы следует ввести емкость, соответствующую току $I_{к.ф} = \sqrt{3} I_{ном}$. Проводники обмоток статора исходного трехфазного двигателя имеют одинаковую площадь поперечного сечения, поэтому нельзя допустить, чтобы при номинальном токе главной фазы ток конденсаторной фазы составлял 1,73 номинального значения.

Однако нет необходимости добиваться идеальной симметрии токов и напряжений, тем более, что она соответствует только одной определенной нагрузке. Вполне достаточно иметь условия, возможно более близкие к симметричному режиму, когда обратное поле не оказывает заметного влияния на работу двигателя.

Номинальной нагрузкой конденсаторного двигателя с тремя статорными обмотками следует признать такую нагрузку, при которой токи в обмотках практически равны номинальному току фазы, обозначенному на щитке.

Таким образом, рабочая емкость конденсаторов, мкФ, может определяться по выражению (24), в котором значение тока конденсаторной фазы принимается равным номинальному:

$$C_{р.ном} = \frac{\sqrt{3}}{2} \frac{I_{ном}}{\omega U} \cdot 10^6. \quad (25)$$

Применительно к частоте 50 Гц эта формула после подстановки $\omega = 314 \text{ с}^{-1}$ и сокращений приводится к (15).

Рабочая емкость $C_{р.ном}$ в соответствии с (25) при условиях $U = \text{const}$, $\omega = \text{const}$ пропорциональна номинальному току фазы.

12. Конденсаторный двигатель как преобразователь числа фаз

В воздушном зазоре конденсаторного двигателя создается вращающееся магнитное поле, которое может стать круговым. Для этого достаточно, чтобы магнитодвижущие силы двух обмоток, образованных из трех фаз исходного трехфазного двигателя (рис. 9, в, г) были численно равны, а токи обмоток сдвинуты во времени на четверть периода. Однако равенство магнитодвижущих сил достигается лишь в частном случае, т.е. соответствует одной определенной нагрузке. С другой стороны, при вращении ротора обратное поле существенно ослабляется, особенно если нагрузка на валу равна номинальной или близка к ней. Предполагается также, что рабочая емкость выбрана правильно.

Изложенное позволяет пренебречь влиянием обратного поля на работу двигателя и принять близкое к действительности допущение, что вращающееся магнитное поле машины является круговым. Силовые линии этого поля, пересекая проводники статорных обмоток, индуктируют в них переменные электродвижущие силы.

Из сказанного следует, что конденсаторный двигатель с тремя статорными обмотками может быть использован для преобразований числа фаз, т.е. в режиме преобразователя однофазного напряжения питающей сети в трехфазное.

Такой преобразователь может найти широкое применение в условиях сельскохозяйственного производства, когда трехфазная сеть отсутствует и в то же время возникает необходимость в источниках питания трехфазных двигателей небольшой мощности (ручной электроинструмент, машинки для стрижки овец и др.).

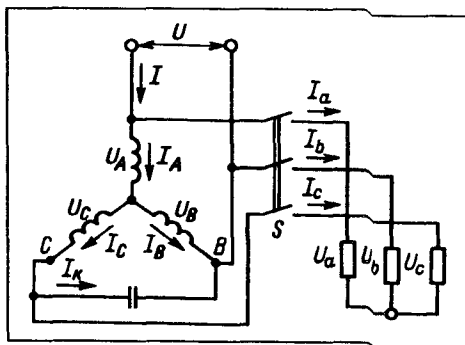


Рис. 18. Схема асинхронного конденсаторного двигателя — преобразователя фаз:

U — напряжение питающей сети; U_A , U_B , U_C — напряжения статорных обмоток двигателя; I_A , I_B , I_C — токи статорных обмоток; I_K — ток конденсатора; U_a , U_b , U_c — напряжения фаз нагрузки; I_a , I_b , I_c — токи фаз нагрузки

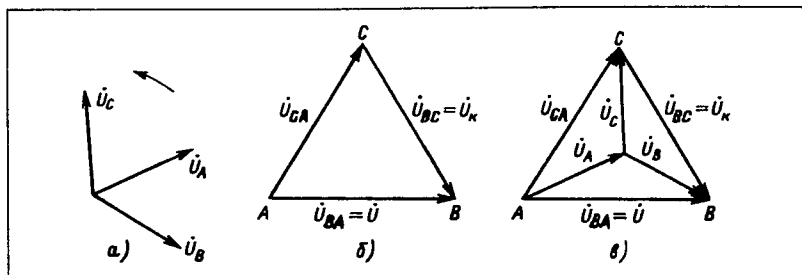


Рис. 19. Векторные диаграммы напряжений конденсаторного двигателя: а — фазные напряжения; б — линейные напряжения; в — фазные и линейные напряжения

Одна из возможных схем конденсаторного двигателя — преобразователя числа фаз, предназначенного для электроснабжения потребителей трехфазного тока, приведена на рис. 18. Статорные обмотки двигателя и сопротивления фаз нагрузки имеют схему соединения звездой.

Для конденсаторного двигателя — преобразователя фаз — возможны следующие режимы работы:

- 1) двигателя (нагрузка приложена со стороны вала, рубильник S разомкнут);
- 2) преобразователя фаз (нагрузка на валу отсутствует, рубильник S замкнут);
- 3) двигателя — преобразователя фаз (нагрузка приложена со стороны вала, рубильник S замкнут).

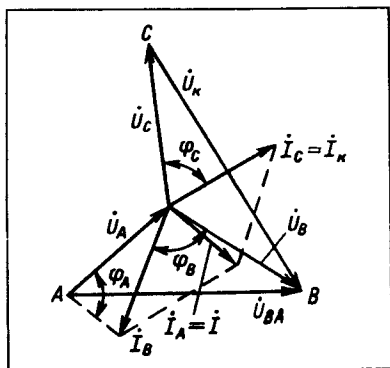


Рис. 20. Векторная диаграмма конденсаторного двигателя с соединением обмоток статора звездой

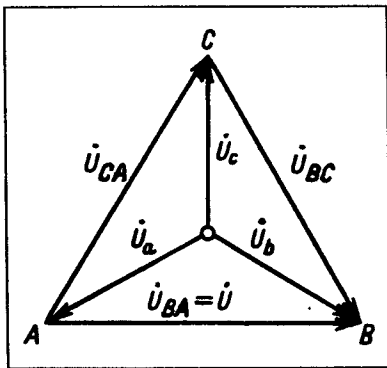


Рис. 21. Векторная диаграмма фазных и линейных напряжений симметричной нагрузки

Очевидно, что в любом из отмеченных режимов ток наиболее нагруженной фазы не должен превышать номинального.

Будем полагать, что рубильник S замкнут и что двигатель используется в качестве преобразователя фаз.

Напряжения статорных обмоток образуют несимметричную трехфазную систему (рис. 19, а), в которой по сравнению с симметричной сохраняется только порядок чередования фаз, отмеченный стрелкой; численные значения напряжений неодинаковы; углы сдвига фаз между векторами $\dot{U}_A, \dot{U}_B, \dot{U}_C$ существенно отличаются от 120° . Положение этих векторов, показанных исходящими из одной точки, устанавливается по векторной диаграмме двигателя с соединением обмоток статора звездой (рис. 20).

Векторы линейных напряжений образуют замкнутый треугольник (рис. 19, б). Построив внутри него векторы фазных напряжений, получим векторную диаграмму напряжений конденсаторного двигателя (рис. 19, в).

Векторная диаграмма напряжений в цепи приемника трехфазного тока приведена на рис. 21.

Сумма токов линейных проводов равна нулю:

$$\dot{I}_a + \dot{I}_b + \dot{I}_c = 0, \quad (26)$$

или, если представить токи в виде произведения напряжений на соответствующие проводимости,

$$\dot{U}_a \dot{Y}_a + \dot{U}_b \dot{Y}_b + \dot{U}_c \dot{Y}_c = 0, \quad (27)$$

где $\dot{Y}_a, \dot{Y}_b, \dot{Y}_c$ — комплексные проводимости фаз нагрузки.

Заметим, что положение вектора на плоскости (называемой комплексной) определяется его проекциями на взаимно перпендикулярные оси — Ox и Oy . Условимся первую называть осью вещественных, вторую — осью мнимых чисел. В комплексном выражении

$$\dot{A} = a_1 + ja_2,$$

где $\dot{A}$ — вектор (комплексное число); a_1 — проекция вектора на ось Ox ; a_2 — проекция вектора на ось Oy ; j — комплексный множитель (мнимая единица), причем

$$j = \sqrt{-1}, \quad j \cdot j = j^2 = -1.$$

Очевидно, что численное значение комплексного числа (его модуль) представляется на комплексной плоскости гипотенузой прямоугольного треугольника, катеты которого равны проекци-

ям на оси Ox и Oy . В данном случае модуль комплексного числа $\dot{A}$ равен:

$$a = \sqrt{a_1^2 + a_2^2}.$$

Комплексное число, отличающееся от данного только знаком перед мнимой частью, называется сопряженным.

Пример 14. Написать выражение для комплексного числа (комплекс) $\dot{B}$, сопряженного с комплексом $\dot{A}$.

По определению имеем:

$$\dot{B} = a_1 - ja_2.$$

Одно из слагаемых правой части равенства комплексного числа может отсутствовать. Это указывает на расположение вектора по одной из осей координат (Ox или Oy).

Пример 15. Выражения для комплекссов тока и напряжения имеют вид $\dot{I} = j20$, $U = 220$ В. Определить положение векторов на комплексной плоскости и найти их числовые значения.

В данном случае вектор тока совпадает с осью Oy (проекция на ось вещественных равна нулю), а вектор напряжения — с осью Ox . Числовые значения: $I = 20$ А, $U = 220$ В.

Рассмотрим некоторые действия над комплексными числами.

При сложении комплексных чисел суммируются отдельно их вещественные и мнимые части.

Пример 16. Найти сумму двух комплексных чисел: $\dot{D} = 12 + j10$ и $\dot{F} = 8 - j25$.

Ответ: $\dot{D} + \dot{F} = (12 + 8) + j(10 - 25) = 20 - j15$.

Умножение комплексных чисел производят по обычной методике.

Пример 17. Найти произведение комплекссов $\dot{G} = 3 + j5$ и $\dot{H} = 3 - j5$.

Находим $\dot{G}\dot{H} = (3 + j5)(3 - j5) = 9 + j15 - j15 + 25 = 34$, т.е. произведение сопряженных комплексных величин дает вещественное число.

Для получения частного от деления двух комплексных чисел необходимо избавиться от мнимой части в знаменателе.

Пример 18. Найти комплексную проводимость фазы, если комплексное сопротивление последней равно: $\dot{Z} = 7,5 + j22,3$.

Комплексная проводимость обратна комплексному сопротивлению, поэтому

$$\dot{Y} = \frac{1}{\dot{Z}} = \frac{1}{7,5 + j22,3} \cdot \frac{7,5 - j22,3}{7,5 - j22,3},$$

или

$$\dot{Y} = \frac{7,5 - j22,3}{7,5^2 + 22,3^2} = 0,0136 - j0,04.$$

Модуль комплексной проводимости равен:

$$y = \sqrt{0,0136^2 + 0,04^2} = 0,042 \text{ См.}$$

Вернемся теперь к соотношению (27) и разрешим его относительно напряжения первой фазы нагрузки U_a .

Из рассмотрения векторной диаграммы (рис. 21) следует:

$$\left. \begin{aligned} \dot{U}_b &= \dot{U}_a + \dot{U}_{BA}; \\ \dot{U}_c &= \dot{U}_a + \dot{U}_{CA}. \end{aligned} \right\} \quad (28)$$

После подстановки в (27) значений фазных напряжений $\dot{U}_b$ и $\dot{U}_c$ из (28) и преобразований получим:

$$\dot{U}_a = \frac{\dot{U}_{BA}\dot{Y}_b + \dot{U}_{CA}\dot{Y}_c}{\dot{Y}_a + \dot{Y}_b + \dot{Y}_c}. \quad (29)$$

Аналогичным образом при определении напряжения второй фазы используются соотношения

$$\left. \begin{aligned} \dot{U}_a &= \dot{U}_b - \dot{U}_{BA}; \\ \dot{U}_c &= \dot{U}_b - \dot{U}_{BC}, \end{aligned} \right\} \quad (30)$$

которые нетрудно установить по векторной диаграмме на рис. 22, и, соответственно, при определении напряжения третьей фазы:

$$\left. \begin{aligned} \dot{U}_a &= \dot{U}_c - \dot{U}_{CA}; \\ \dot{U}_b &= \dot{U}_c + \dot{U}_{BC}. \end{aligned} \right\} \quad (31)$$

В результате совместного решения уравнений (27) и (30) и затем (27) и (31) находим выражения для напряжений второй и третьей фазы нагрузки:

$$\dot{U}_b = \frac{\dot{U}_{BA}\dot{Y}_a + \dot{U}_{BC}\dot{Y}_c}{\dot{Y}_a + \dot{Y}_b + \dot{Y}_c}; \quad (32)$$

$$\dot{U}_c = \frac{\dot{U}_{CA}\dot{Y}_a - \dot{U}_{BC}\dot{Y}_b}{\dot{Y}_a + \dot{Y}_b + \dot{Y}_c}. \quad (33)$$

Из (29), (32), (33) следует, что для определения фазных напряжений нагрузки должны быть известны комплексы междофазных напряжений и комплексные проводимости фаз.

Токи нагрузки находятся по соотношениям

$$\dot{I}_a = \dot{U}_a \cdot \dot{Y}_a; \quad \dot{I}_b = \dot{U}_b \cdot \dot{Y}_b; \quad \dot{I}_c = \dot{U}_c \cdot \dot{Y}_c.$$

Как видно из схемы на рис. 18

$$\dot{I}_a = \dot{I} - \dot{I}_A,$$

где $\dot{I}$ — ток, потребляемый двигателем из сети.

Для тока первой фазы имеем:

$$\dot{I}_A = \dot{I}_B + \dot{I}_C.$$

Токи системы связаны между собой зависимостями

$$\dot{I}_a = \dot{I} - (\dot{I}_B + \dot{I}_C); \quad \dot{I}_b = \dot{I}_B + \dot{I}_c - \dot{I}; \quad \dot{I}_c = \dot{I}_C - \dot{I}_k.$$

Сумма токов правой части уравнений обращается в нуль, что находится в полном соответствии с (26).

Рассмотрен общий случай трехфазной нагрузки, когда комплексные проводимости фаз могли иметь различные произвольные значения — одинаковые или неодинаковые. Однако, наиболее характерной нагрузкой конденсаторного двигателя как преобразователя фаз является симметричная нагрузка, для которой

$$\dot{Y}_a = \dot{Y}_b = \dot{Y}_c = \dot{Y}.$$

О учетом этого равенства расчетные соотношения (29), (32), (33) приводятся к виду

$$\dot{U}_a = -\frac{\dot{U}_{BA} + \dot{U}_{CA}}{3}; \quad (34)$$

$$\dot{U}_b = -\frac{\dot{U}_{BA} + \dot{U}_{BC}}{3}; \quad (35)$$

$$\dot{U}_c = -\frac{\dot{U}_{CA} + \dot{U}_{BC}}{3}. \quad (36)$$

13. Работа конденсаторного двигателя при условиях, отличающихся от номинальных

Наиболее высокие энергетические показатели при эксплуатации конденсаторного двигателя достигаются при соблюдении следующих условий:

- частота неизменна и равна номинальной ($f = f_{\text{ном}}$);
- напряжение на выводах машины равно номинальному;
- токи обмоток не превышают номинальных значений.

Последнее условие применительно к схемам, приведенным на рис. 9, в, г, может быть записано в виде:

$$I_{\text{г.ф}} \approx I_{\text{к.ф}} \approx I_{\text{ном}}$$

Выполнение этого равенства обеспечивается правильным выбором рабочей емкости и соответствующей нагрузкой на валу двигателя.

Изменение частоты не является сколько-нибудь существенным даже в энергосистемах местного значения, поэтому им можно пренебречь.

Непостоянство (снижение) напряжения обычно возникает в часы наибольшей нагрузки сети. При этом в значительно большей степени уменьшается вращающий момент, так как для асинхронного двигателя он пропорционален квадрату приложенного напряжения. Так, например, понижение напряжения на 30 % вызывает уменьшение момента в 2 раза. В результате такого снижения напряжения двигатель остановится, либо будет продолжать вращаться с повышенным скольжением (потребляя большой ток), что может вызвать недопустимый перегрев статорных обмоток, составляющих главную фазу. Отмеченное важное обстоятельство следует иметь в виду, особенно при питании двигателей от электросетей местного значения с источниками небольшой мощности.

При длительной эксплуатации двигателя с пониженным напряжением необходимо производить соответствующее уменьшение нагрузки.

К нежелательным последствиям, с точки зрения нагрева статорных обмоток, может привести также несоблюдение третьего условия. Действительно, при всякой нагрузке, превышающей номинальную, перегружается по току главная фаза. То же самое происходит с конденсаторной фазой, только в случае работы с недогрузкой. На холостом ходу ток конденсаторной фазы при выборе рабочей емкости по приведенным выше соотношениям дости-

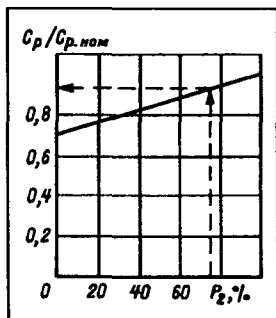


Рис. 22. Зависимость рабочей емкости от нагрузки

гает 120 – 140 % номинального. В последнем случае электрические потери возрастают в 2 раза по сравнению с потерями при номинальном токе.

Сказанное позволяет сделать следующие выводы:

нельзя допускать длительную перегрузку или длительную работу двигателя без нагрузки;

при длительной работе двигателя с недогрузкой рабочую емкость конденсаторов необходимо уменьшать.

Для нагрузки, составляющей, например, 50 % номинальной, можно принять

$$C_p \approx 0,85 C_{p.ном}$$

Ток конденсаторной фазы при этом не превышает номинального значения.

Воспользовавшись графиком, представленным на рис. 22, легко определить рабочую емкость конденсаторов для любой произвольной нагрузки. С этой целью, выразив полезную мощность P_2 в процентах номинальной мощности $P_{2ном}$, находим соответствующее отношение $C_p/C_{p.ном}$, а затем и искомую емкость. Так, например, для $P_2 = 0,75 P_{2ном}$ отношение $C_p/C_{p.ном} = 0,93$ (см. стрелки на рис. 22). Следовательно,

$$C_p = 0,93 C_{p.ном}$$

Следует отметить, что номинальные данные асинхронных двигателей относятся ко вполне определенным условиям их использования. Наиболее существенными из этих условий являются: температура окружающей среды; высота над уровнем моря (до 1000 м).

Допустимые значения температуры окружающей среды устанавливаются техническими условиями. В частности, асинхронные двигатели единой серии 4А могут работать с номинальной мощностью, указанной в их паспортных данных, на всем диапазоне изменения температуры от -40 до $+40^\circ\text{C}$.

Влияние высоты над уровнем моря, большей 1000 м, проявляется в том, что вследствие разрежения воздуха условия охлаждения ухудшаются.

Из сказанного вытекает, что при эксплуатации двигателей на высоте более 1000 м над уровнем моря или при температуре окружающей среды, превышающей 40°C , их номинальная мощность должна быть снижена.

14. Улучшение эксплуатационных свойств конденсаторного двигателя

Конденсаторный двигатель прост по конструкции, имеет высокий коэффициент мощности, работает от двухпроводной и, в частности, от осветительной сети.

Как было отмечено, применение рациональных схем включения создает возможность получения достаточного пускового момента и приводит к улучшению использования мощности машины. Одну из таких схем (см. рис. 9, *г*) будем иметь в виду при дальнейшем изложении.

Несмотря на отмеченные положительные свойства эксплуатации конденсаторного двигателя с рабочей и пусковой емкостями характеризуется рядом определенных недостатков. Основные из них заключаются в следующем: для создания необходимого пускового момента приходится включать в цепь конденсаторной фазы дополнительную емкость, отключаемую после пуска. При разрыве цепи отключаемой емкости возникающее в месте разрыва искрение уменьшает безопасность эксплуатации двигателя, особенно во взрывоопасных помещениях. Кроме того, резкое уменьшение тока конденсаторной фазы после отключения дополнительной емкости связано с появлением динамических толчков и уменьшением ускорения ротора, что подтверждается осциллограммами (рис. 23);

описанный выше характер изменения тока конденсаторной фазы с изменением нагрузки приводит к ухудшению использова-

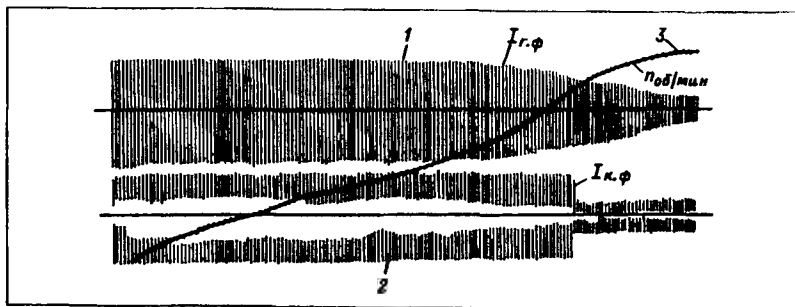


Рис. 23. Осциллограммы, снятые при пуске конденсаторного двигателя с отключаемой емкостью:

1 — ток главной фазы; 2 — ток конденсаторной фазы; 3 — частота вращения ротора

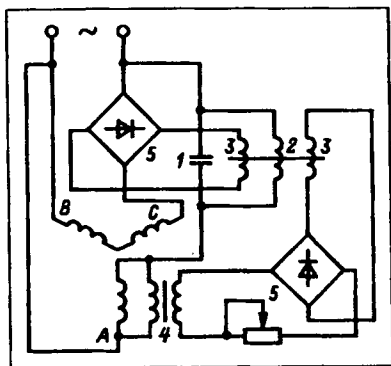


Рис. 24. Схема включения конденсаторного двигателя с регулируемой эквивалентной емкостью:

1 — конденсатор; 2 — обмотка переменного тока реактора; 3 — обмотки подмагничивания; 4 — трансформатор напряжения; 5 — выпрямители

уменьшением емкости конденсаторов. Чтобы далее (с увеличением нагрузки) ток конденсаторной фазы увеличивался, необходимо производить увеличение емкости, т.е. осуществлять ее регулирование. Желательно, чтобы последнее совершалось плавно и автоматически, начиная с момента пуска двигателя.

Автоматическое регулирование эквивалентной емкости в цепи конденсаторной фазы возможно различными способами. Один из них основывается на использовании в схеме реактора со стальным сердечником, причем индуктивное сопротивление реактора регулируется с помощью обмоток подмагничивания.

Рассмотрим схему включения конденсаторного двигателя (рис. 24), в которой обмотка переменного тока реактора включена на напряжение конденсатора. Таким образом, в цепь конденсаторной фазы вводится колебательный контур, о котором говорилось выше.

Реактор имеет две обмотки подмагничивания, включенные встречно. Ток одной из них пропорционален току главной фазы двигателя, ток другой — напряжению на конденсаторной фазе. Первая обмотка имеет небольшое число витков. Действие МДС

ния мощности двигателя и уменьшению его перегрузочной способности;

холостой ход конденсаторного двигателя с постоянной рабочей емкостью $C_{p.ном}$ не только нежелателен, но и опасен, так как ток конденсаторной фазы, достигая в этом случае наибольшего значения, может вызвать недопустимый перегрев обмотки.

Расширение областей применения конденсаторного двигателя непосредственно связано с устранением отмеченных недостатков.

Ограничение тока конденсаторной фазы при холостом ходе может быть достигнуто

этой обмотки проявляется тем сильнее, чем больше скольжение, т.е. чем больше ток главной фазы.

Вторая обмотка подмагничивания с бóльшим числом витков является основной. Действие МДС этой обмотки, наоборот, проявляется тем сильнее, чем меньше скольжение, что объясняется характером изменения напряжения на конденсаторной фазе с изменением нагрузки.

В первый момент пуска переменный ток реактора должен быть возможно малым. Очевидно, что при равенстве МДС обмоток подмагничивания он будет равен току холостого хода реактора.

Соблюдение равенства МДС обмоток подмагничивания достигается благодаря тому, что по главной фазе двигателя протекает наибольший (пусковой) ток, а напряжение на конденсаторной фазе в момент пуска приблизительно в 2 раза меньше напряжения по окончании пуска. В результате ток на выходе параллельного участка, образованного конденсатором и обмотками переменного тока реактора, т.е. ток конденсаторной фазы, достигает своего наибольшего значения, определяемого установленной емкостью. Незначительным током первичной обмотки трансформатора напряжения здесь можно пренебречь.

По мере увеличения частоты вращения двигателя возрастает результирующая МДС подмагничивания, вызывая насыщение сердечника реактора. Переменный ток реактора при этом увеличивается, а ток конденсаторной фазы уменьшается. При холостом ходе двигателя результирующая МДС подмагничивания реактора достигает наибольшего значения, вследствие чего ток конденсаторной фазы становится наименьшим.

Каким же становится характер изменения тока конденсаторной фазы после пуска двигателя? Ток конденсаторной фазы, как следует из изложенного, становится функцией результирующей МДС подмагничивания реактора. Так, увеличение нагрузки на валу двигателя вызывает уменьшение результирующей МДС подмагничивания реактора, отчего переменный ток последнего уменьшается, а ток конденсаторной фазы возрастает. Уменьшение нагрузки приводит к обратному результату, т.е. к уменьшению тока конденсаторной фазы.

Ток конденсатора и ток обмоток переменного тока реактора находятся практически в противофазе, так как активные составляющие этих токов пренебрежимо малы. Поэтому значение тока

конденсаторной фазы всегда определяется арифметической разностью токов регулирующего устройства:

$$I_{\text{к.ф}} = I_{\text{к}} - I_{\text{р}},$$

где $I_{\text{к}}$ — ток конденсатора, $I_{\text{р}}$ — ток обмоток переменного тока реактора.

Из последнего выражения следует, что соответствующее изменение переменного тока реактора с изменением скольжения равносильно применению в цепи конденсаторной фазы плавно регулируемой эквивалентной емкости.

Для иллюстрации на рис. 25 представлены механические характеристики двигателя мощностью 1 кВт, полученные опытным путем. Кривая 1 относится к схеме с пусковой и рабочей емкостями (см. рис. 9, з). Кривая 2 относится к схеме рис. 24. Как видно, пусковой момент двигателя для данной емкости конденсатора остается практически одним и тем же в обоих случаях. На участке от $n = 0$ до 1000 об/мин кривая 2 проходит несколько ниже кривой 1, что объясняется уменьшением эквивалентной емкости регулирующего устройства с возрастанием переменного тока реактора.

Отключение пускового конденсатора в случае использования в цепи конденсаторной фазы отключаемой емкости (см. рис. 9, з) резко уменьшает вращающий момент (вертикальный участок кривой 1).

Для двигателя, включенного по схеме на рис. 24, наоборот, характерны плавный пуск двигателя, увеличенная перегрузочная способность и работа при данной нагрузке на валу с несколько меньшим скольжением.

Приведем пример применения конденсаторного двигателя, включенного по схеме, приведенной на рис. 24, в условиях электрической тяги. Целесообразность использования асинхронного конденсаторного двигателя в электрической тяге подтверждается следующим: двигатель имеет жесткую скоростную характеристи-

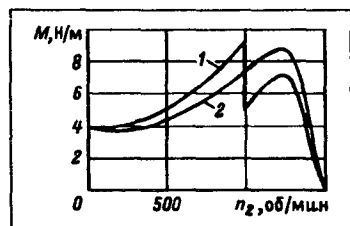


Рис. 25. Механические характеристики конденсаторного двигателя:

1 — с отключаемой емкостью; 2 — с плавно регулируемой эквивалентной емкостью

стику, вследствие которой средняя частота вращения лишь на несколько процентов отличается от синхронной. Таким образом, буксование при движении ограничивается; при сверхсинхронной частоте вращения (движение под уклон) машина автоматически переходит в генераторный режим, производя тормозное действие; как конденсаторный — двигатель работает с высоким коэффициентом мощности.

Опытный образец электровоза подвесной дороги с конденсаторным двигателем показан на рис. 26. Двигатель электровоза

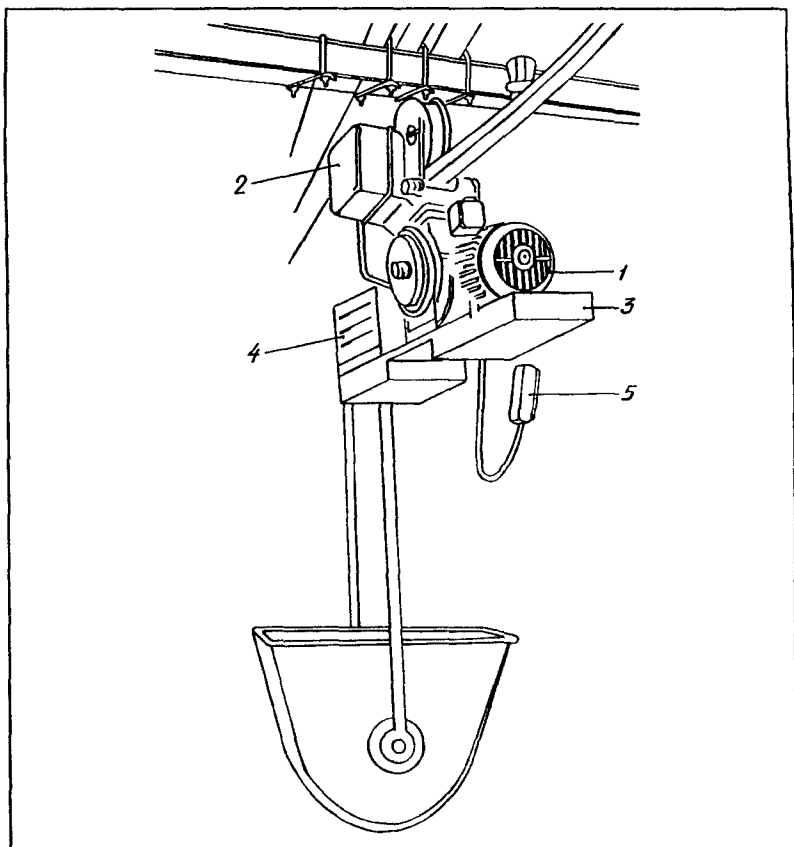


Рис. 26. Электровоз подвесной дороги с конденсаторным двигателем:
1 — двигатель; 2 — реверсивный магнитный пускатель; 3 — коробка с конденсаторами; 4 — кожух реактора; 5 — кнопочная станция для ручного управления

мощностью 1 кВт, 127/220 В включен по схеме рис. 24 на напряжение сети 220 В.

Контактный провод (полосовая сталь 6×30 мм) крепится на изоляторах. Вторым проводом служит заземленный рельс. Управление электровозом возможно как ручное (с помощью кнопочной станции реверсивного магнитного пускателя), так и автоматическое — при установке конечных выключателей в пунктах отправления и выгрузки. Полезная масса состава 0,6 т.

Конденсаторный двигатель с плавно регулируемой эквивалентной емкостью имеет следующие достоинства:

пуск протекает без переключений в цепи конденсаторной фазы и динамических толчков, неизбежных при пуске с отключаемой емкостью;

уменьшается ток холостого хода конденсаторной фазы;

улучшается использование мощности вследствие возрастания тока конденсаторной фазы при увеличении нагрузки на валу;

увеличивается перегрузочная способность.

Конденсаторный двигатель с автоматически регулируемой эквивалентной емкостью может найти применение в электрической тяге, а также в стационарных установках небольшой мощности.

Следует, однако, отметить что наличие в схеме конденсаторного двигателя реактора со стальным сердечником и обмотками подмагничивания приводит к увеличению массы и габаритов всей установки. Рациональнее вместо нелинейного реактора использовать реактор без сердечника с постоянной индуктивностью (линейный реактор). Эффект получения плавно регулируемой эквивалентной емкости с изменением нагрузки двигателя достигается в этом случае путем применения в схеме полупроводниковых приборов.

Полупроводниковые приборы получили большое распространение в радиосвязи, автоматизированном электроприводе, в телевизионных устройствах и телемеханике, электронных устройствах атомной и ракетной техники, в медицине, металлургии и т.д.

Рассмотрим схему конденсаторного двигателя, основанную на использовании полупроводниковых приборов (рис. 27).

В силовую часть схемы входят статорные обмотки двигателя, конденсатор постоянной емкости, линейный реактор и тиристоры. Последние соединены между собой встречно-парал-

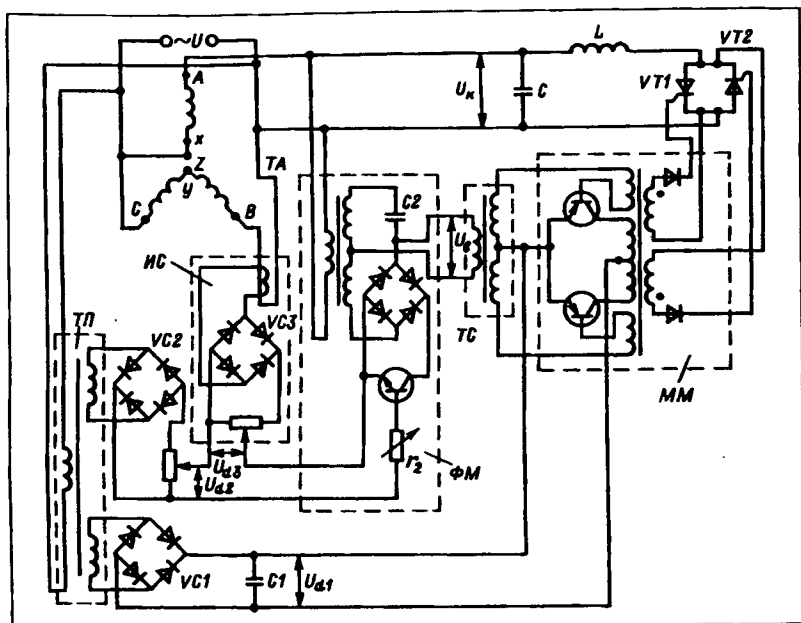


Рис. 27. Схема включения конденсаторного двигателя с регулятором эквивалентной емкости на полупроводниковых приборах:

ТА — трансформатор тока; ИС — источник сигнала; ФМ — фазовращательный мост; ТС — трансформатор согласования; ММ — магнитный мультивибратор; VT1, VT2 — тиристоры; C — емкость конденсаторной фазы; L — индуктивность линейного реактора; ТП — трансформатор питания (через выпрямители) мультивибратора и системы регулирования эквивалентной емкости конденсаторной фазы

тельно, а последовательная цепь, образованная обмоткой реактора и тиристорами, включена параллельно конденсатору.

Фаза А — х является конденсаторной. Две другие старторные обмотки (фазы В — у, С — з) образуют главную фазу, включаемую на напряжение сети.

Баланс напряжений двигателя описывается уравнениями:

$$\dot{U}_B - \dot{U}_C = \dot{U}_{BC} = \dot{U}, \quad \dot{U}_A + \dot{U}_K = \dot{U}.$$

Ток конденсаторной фазы равен геометрической сумме токов конденсатора и реактора:

$$\dot{I}_A = \dot{I}_{к.ф} = \dot{I}_к + \dot{I}_р,$$

где $\dot{I}_к$ — ток конденсатора; $\dot{I}_р$ — ток реактора.

Если пренебречь потерями в конденсаторе и реакторе, то он будет определяться арифметической разностью этих токов:

$$I_A = I_k - I_p,$$

причем по условию сдвига фаз между токами главной и конденсаторной фаз на угол, равный или близкий к 90° (см. векторную диаграмму на рис. 20), должно быть выполнено неравенство

$$I_k > I_p.$$

Ток конденсатора постоянной емкости остается практически постоянным:

$$I_k \approx \text{const.}$$

Следовательно, необходимого изменения тока конденсаторной фазы с изменением нагрузки двигателя можно достигнуть путем соответствующего регулирования тока реактора. Возникающее при этом изменение разности токов ($I_k - I_p$) аналогично регулированию эквивалентной емкости цепи конденсаторной фазы.

Очевидно, что с возрастанием нагрузки ток реактора должен уменьшаться и, наоборот, увеличиваться, когда нагрузка уменьшается. Тогда по характеру изменения тока конденсаторная фаза не будет отличаться от главной фазы.

Оптимальному режиму регулирования соответствует равенство токов

$$I_A = I_{к.ф} = I_{г.ф}$$

при любой произвольно взятой нагрузке.

Из изложенного следует, что по идее регулирования эквивалентной емкости конденсаторной фазы схемы, приведенные на рис. 24 и 27, аналогичны. Однако они принципиально отличаются друг от друга по способу воздействия на ток реактора. Если в схеме рис. 24 переменный ток реактора зависит от режима подмагничивания сердечника, то в рассматриваемой схеме действующее значение тока реактора зависит от угла сдвига фаз управляющих прямоугольных сигналов, подводимых к тиристорам, относительно напряжения на конденсаторе.

Будем по-прежнему полагать, что потери в конденсаторе и реакторе отсутствуют. При этом допущении ток реактора будет отставать от приложенного к нему напряжения по фазе на 90° . Синусоидальные кривые напряжения на конденсаторе и тока

реактора показаны на рис. 28, а. По этим кривым, построенным в определенном масштабе, нетрудно определить значения напряжения u_k на конденсаторе или тока i_p реактора для любого момента времени.

Обозначим угол сдвига фаз управляющих прямоугольных импульсов относительно напряжения на конденсаторе через θ и рассмотрим зависимость тока реактора от этого угла применительно к следующим случаям: а) $\theta = 90^\circ$; б) $90^\circ < \theta < 180^\circ$; в) $\theta = 180^\circ = \theta''$.

На вход тиристоров VT1 и VT2 поочередно подаются управляющие импульсы напряжения u_{y1} и соответственно u_{y2} (рис. 28, б–г).

Ток реактора, управляемый с помощью тиристоров, будет несинусоидальным. Но периодически изменяющуюся функцию времени с несинусоидальной формой кривой, как известно из электротехники, можно представить в виде суммы составляющих синусоид, из которых определяющее значение имеет первая (основная) гармоника. Ее мы и будем иметь в виду при дальнейшем изложении.

Случай а. Управляющие импульсы напряжения должны быть сдвинуты по фазе относительно напряжения u_k в сторону отставания на 90° , что иллюстрируется кривыми, приведенными на рис. 28, а, б.

Как видно, в момент прохождения напряжения u_k через положительный максимум на вход тиристора VT1 подается управляющий импульс напряжения u_{y1} , и этот тиристор открывается. По обмотке реактора проходит ток в течение всего положительного полупериода.

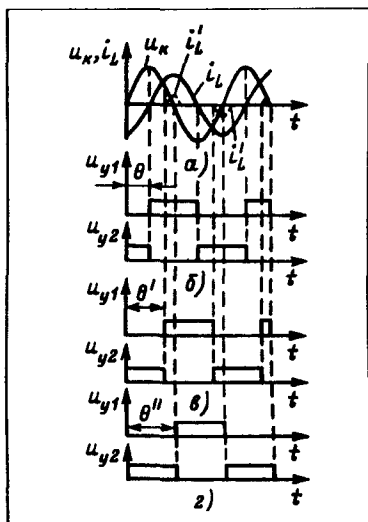


Рис. 28. Графики, поясняющие процесс регулирования тока линейного реактора с помощью тиристоров:

а — синусоидальные кривые изменения напряжения конденсатора и тока реактора; б — зависимости прямоугольных управляющих импульсов напряжений, подаваемых на вход тиристоров при фазовом угле

сдвига $\theta = (\hat{U}_k, \hat{U}_y) = 90^\circ$; в — то же при $90^\circ < \theta < 180^\circ$; г — то же при $\theta = \theta'' = 180^\circ$

Когда напряжение u_k , изменяясь, достигнет наибольшего отрицательного значения, на вход тиристора $VT2$ подается управляющий импульс напряжения u_{y2} и этот тиристор открывается. В тот же момент времени прекращается подача импульса напряжения u_{y1} . Тиристор $VT1$, оказавшись под воздействием обратного напряжения, закрывается. По обмотке реактора в течение всего отрицательного полупериода проходит ток i_p .

Затем, как только напряжение u_k вновь достигнет положительной амплитуды, откроется тиристор $VT1$, тиристор $VT2$ закроется и т.д.

Таким образом, при сдвиге управляющих прямоугольных сигналов относительно напряжения u_k в сторону отставания на 90° по обмотке реактора проходит ток в течение всего периода, а амплитуда тока реактора достигает наибольшего значения.

Индуктивное сопротивление реактора (по первой гармонике) имеет минимальное значение. Из сказанного следует, что углу сдвига фаз $\theta = 90^\circ$ соответствует наименьшее значение тока конденсаторной фазы.

Случай б. Угол сдвига фаз может принять, например, значение, показанное на рис. 28, в: $\theta = \theta'$.

В момент подачи управляющего импульса напряжения u_{y1} на вход тиристора $VT1$ (см. рис. 27) этот тиристор открывается, и по обмотке реактора начинает протекать ток i_p' в положительном направлении. При прохождении напряжения u_k через нулевое значение ток i_p' достигает наибольшего значения и далее начинает уменьшаться.

Вследствие того, что управляющие сигналы, подаваемые на вход тиристоров, сдвинуты по фазе на 180° , через полпериода напряжения u_k включится тиристор $VT2$ и по обмотке реактора пойдет ток i_p' в обратном (отрицательном) направлении. Затем, еще через полпериода напряжения u_k включится тиристор $VT1$, и направление тока i_p' изменится на обратное и т.д.

Очевидно, что по мере увеличения угла θ от 90° до 180° амплитуда первой гармоники тока реактора будет все более уменьшаться, а ток конденсаторной фазы возрастать. Следовательно, с увеличением нагрузки на валу машины необходимо осуществлять увеличение угла θ в пределах от 90° до 180° .

Случай в. Предельному случаю, при котором угол θ принимает значение $\theta'' = 180^\circ$, соответствуют кривые на рис. 28, г. Управляющий импульс напряжения u_{y1} подается на вход тиристора $VT1$, когда напряжение u_k , изменив свой знак, начина-

ет увеличиваться в отрицательном направлении. Тиристор оказывается под воздействием обратного напряжения и не открывается.

Через полпериода будет подан управляющий импульс напряжения $u_{г2}$ на вход тиристора VT_2 . Этот тиристор тоже окажется под воздействием обратного напряжения и не откроется.

Условию $\theta = \theta'' = 180^\circ$ соответствует равенство

$$I_A = I_{к.ф} = I_k,$$

так как цепь реактора остается разомкнутой.

Итак, для ограничения тока реактора с увеличением нагрузки двигателя необходимо увеличивать угол θ от 90° до значения, соответствующего приложенной нагрузке.

Схема регулирования, обеспечивающая указанный характер изменения угла θ , обычно включает в себя следующие элементы (см. рис. 27):

1) магнитный мультивибратор $ММ$, преобразующий синусоидальное напряжение в прямоугольное (для управления тиристорами) и усиливающий мощность управляющих сигналов;

2) фазовращательный мост $ФМ$ для изменения фазы выходного синусоидального напряжения относительно напряжения U_k ;

3) трансформатор согласования $ТС$ параметров выходной цепи фазовращательного моста с параметрами входа мультивибратора;

4) измерительный элемент, измеряющий ток главной фазы двигателя и осуществляющий воздействие на систему регулирования для изменения тока реактора в соответствии с изменением тока главной фазы;

5) устройство для обеспечения начального значения угла θ (при минимальном значении тока главной фазы).

Мультивибратор $ММ$ (рис. 29) состоит из двух транзисторов VT_1 , VT_2 , включенных по схеме с общим эмиттером, и трансформатора T , имеющего четыре первичные и две вторичные обмотки.

Рассмотрим принцип действия мультивибратора. Пусть ЭДС источников сигналов $e'_{2с}$ и $e''_{2с}$ направлены, как показано на рис. 29, сверху вниз, причем потенциал базы транзистора VT_1 по отношению к потенциалу эмиттера становится отрицательным. Транзистор VT_1 открывается. В то же время транзистор VT_2 за-

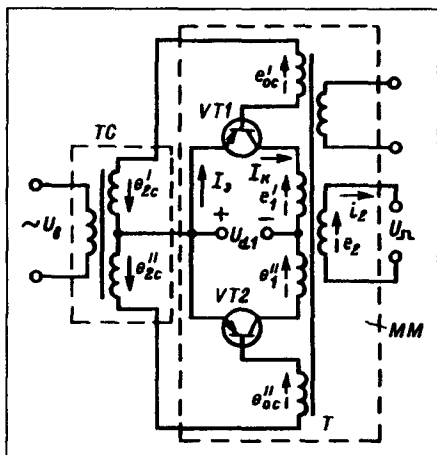


Рис. 29. Схема магнитного мультивибратора

Под влиянием ЭДС e_2 вторичной обмотки мультивибратора по сопротивлению нагрузки, не показанному на рис. 29, потечет ток i_2 .

Как видно, ЭДС первичных обмоток мультивибратора, включенных в цепи e'_{oc} и e''_{oc} имеют направление, при котором на базе транзистора $VT1$ поддерживается отрицательный потенциал, а на базе транзистора $VT2$ — положительный. Таким образом, эти обмотки выполняют функции положительной обратной связи.

С изменением знака ЭДС источников сигналов, а именно, когда потенциал базы транзистора $VT2$ по отношению к потенциалу эмиттера станет отрицательным, а потенциал базы транзистора $VT1$ по отношению к потенциалу эмиттера — положительным, произойдет переключение транзисторов. Во втором полупериоде входного напряжения мультивибратора открывается транзистор $VT2$, а транзистор $VT1$ закрывается. В следующем полупериоде транзисторы поменяются выполняемыми функциями и т.д. Таким образом, транзисторы мультивибратора и обмотки, включенные в коллекторные цепи транзисторов, работают по полупериодам. Частота переключения транзисторов определяется частотой входного напряжения.

На выходе мультивибратора формируется переменное напряжение прямоугольной формы, т.е. мультивибратор преобразует синусоидальное напряжение в прямоугольное и, кроме того,

крыт, так как на его базу подается положительный по отношению к эмиттеру потенциал.

В контуре плюс источника питания — эмиттер транзистора $VT1$ — коллектор — первичная обмотка трансформатора T — минус источника питания возникает ток, создающий в сердечнике магнитный поток. С изменением магнитного потока в обмотках трансформатора T наводятся ЭДС, обозначенные на рис. 29 пунктирными стрелками.

усиливает мощность управляющих сигналов. Возможность получения кривой выходного напряжения с достаточно крутым фронтом обеспечивается применением ферритового сердечника с прямоугольной формой петли гистерезиса.

Магнитный поток сердечника при переключении транзисторов изменяется от одного предельного значения до другого за время от 0,3 до 12 мкс, т.е. почти мгновенно.

Питание магнитного мультивибратора осуществляется от выпрямителя $VC1$, включенного в цепь одной из вторичных обмоток трансформатора $ТП$ (см. рис. 27). Конденсатор с емкостью $C1$, находящийся под напряжением U_{d1} , служит фильтром высших гармоник.

Фазовращательный мост (рис. 27 и 30) состоит из трансформатора, конденсатора с емкостью $C_2 = \text{const}$, выпрямителя и регулируемого активного сопротивления $r_2 = \text{var}$.

Две выходные обмотки трансформатора выполняют роль двух плеч моста. Два других плеча образуют конденсатор и активное сопротивление. Последнее реализуется в виде транзистора, включенного в диагональ выпрямительного моста.

Напряжение U_b , возникающее на выходных зажимах фазовращательного моста ΦM , подается на вход трансформатора согласования $ТС$ (см. рис. 27).

Рассмотрим принцип действия ΦM , полагая для упрощения, что нагрузка отсутствует, т.е. мост работает в режиме холостого хода (рис. 30).

Напряжения вторичных обмоток ΦM равны и совпадают по фазе:

$$\dot{U}'_2 = \dot{U}''_2.$$

Ток I_2 , проходя по замкнутому контуру, образованному плечами ΦM , вызывает падения напряжения:

на активном сопротивлении

$$\dot{U}_{a2} = \dot{I}_2 r_2$$

и на сопротивлении конденсатора фазовращательного моста

$$\dot{U}_{c2} = \dot{I}_2 x_{c2},$$

причем первое совпадает по фазе с током, а второе отстает от него на 90° .

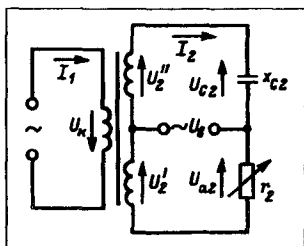


Рис. 30. Принципиальная схема фазовращательного моста

Баланс напряжений вторичной цепи трансформатора описывается уравнением

$$\dot{U}_2 = \dot{U}'_2 + \dot{U}''_2 = \dot{U}_{a2} + \dot{U}_{C2},$$

т.е. напряжение $\dot{U}_2$ на выходе трансформатора всегда равно геометрической сумме падений напряжений на активном сопротивлении r_2 ФМ и на реактивном сопротивлении конденсатора x_{C2} . Эти падения напряжений связаны с напряжением $\dot{U}_B$ на выходе ФМ, т.е. на входе трансформатора согласования (см. рис. 27) ТС, соотношениями

$$\dot{U}_{a2} = \dot{U}'_2 + \dot{U}_B;$$

$$\dot{U}_{C2} = \dot{U}''_2 - \dot{U}_B,$$

из которых нетрудно определить напряжение на выходе ФМ по значению и фазе.

Если соблюдается равенство сопротивлений

$$r_2 = x_{C2}, \text{ то } U_{a2} = U_{C2}$$

и векторная диаграмма ФМ принимает вид, показанный на рис. 31, а. При этом условии напряжение $\dot{U}_B$ на выходе ФМ сдвинуто относительно напряжения $\dot{U}_K$ по фазе на 90° в сторону отставания.

С увеличением активного сопротивления падения напряжений на сопротивлениях ФМ перераспределяются и вектор напряжения $\dot{U}_B$ на выходе моста поворачивается в направлении часовой стрелки. Так соотношению сопротивлений

$$r_2 = 2x_{C2}$$

соответствует векторная диаграмма рис. 31, б.

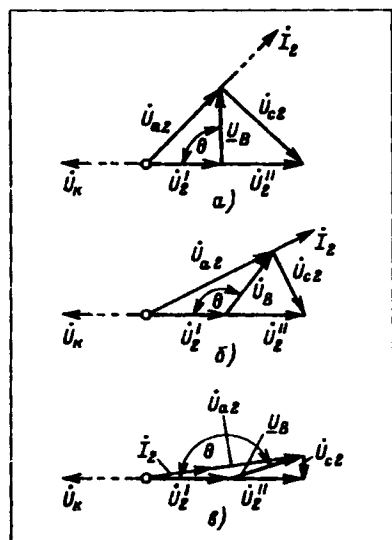


Рис. 31. Векторные диаграммы фазовращательного моста:

а — при $r_2 = x_{C2}$ ($\theta = 90^\circ$); б — при $r_2 = 2x_{C2}$ ($90^\circ < \theta < 180^\circ$); в — при $r_2 = 10x_{C2}$ ($\theta \approx 180^\circ$)

Угол, образованный векторами $\dot{U}_B$ и $\dot{U}_K$, превышает 90° , а при соотношении

$$r_2 = 10x_{C2}$$

он приближается к 180° (рис. 31, в).

Из изложенного следует, что увеличение активного сопротивления ΦM от $r_2 = x_{C2}$ до некоторого значения $r_2 \gg x_{C2}$ вызывает увеличение угла сдвига фаз от $(\widehat{U_K}, \widehat{U_B}) = 90^\circ$ до $(\widehat{U_K}, \widehat{U_B}) \approx 180^\circ$. Приблизительно можно считать, что и прямоугольное напряжение на выходе мультивибратора будет таким же образом изменяться по фазе относительно напряжения $\dot{U}_K$ с изменением активного сопротивления r_2 , т.е. от $\theta = 90^\circ$ до $90^\circ < \theta \leq 180^\circ$.

Итак, уменьшение тока реактора, включенного в цепь конденсаторной фазы параллельно конденсатору (см. рис. 27), с ростом тока главной фазы достигается увеличением фазового угла сдвига θ путем увеличения активного сопротивления $r_2 \Phi M$ в пределах от $r_2 = x_{C2}$ до $r_2 \approx (20 \div 30)x_{C2}$.

Сопротивление r_2 — это сопротивление коллекторной цепи транзистора, являющееся функцией тока базы. Оно увеличивается с уменьшением тока базы.

Следовательно, при минимальной нагрузке (режим холостого хода двигателя) необходимо создать начальный ток базы, удовлетворяющий равенству сопротивлений $r_2 = x_{C2}$. С появлением нагрузки ток базы транзистора должен уменьшаться тем сильнее, чем больше нагрузка.

Для создания начального тока базы транзистора служит трансформатор $ТП$ (см. рис. 27), одна из вторичных обмоток которого через выпрямитель $VC2$ присоединена к потенциометру. Напряжение на выходе потенциометра не зависит от режима работы двигателя и при данном фиксированном положении подвижного контакта остается постоянным:

$$U_{d2} = \text{const.}$$

Напряжение на выходе другого потенциометра, включенного через выпрямитель $VC3$ во вторичную цепь трансформатора

тока, являющееся напряжением обратной связи, пропорционально току главной фазы:

$$U_{d3} = kI_{г.ф.},$$

где k — коэффициент пропорциональности.

Напряжения U_{d2} и U_{d3} действуют в цепи база — эмиттер транзистора, причем относительно друг друга они направлены встречно. Их алгебраическая сумма определяет напряжение, подведенное к этой цепи:

$$U_{б.э} = U_{d2} - kI_{г.ф.}$$

При номинальном токе главной фазы ток базы транзистора становится наибольшим, что видно из соотношения

$$U_{б.э \max} = U_{d2} - kI_{г.ф \min}.$$

При этом в цепи эмиттер — коллектор транзистора проходит увеличенный ток, при котором обеспечивается равенство сопротивлений ΦM ($r_2 = x_{C2}$), соответствующее фазовому углу сдвига $\theta = 90^\circ$.

Увеличение нагрузки (тока главной фазы) приводит к уменьшению напряжения $U_{б.э}$ и соответственно тока базы транзистора. Сопротивление цепи коллектор — эмиттер увеличивается, вызывая увеличение фазового угла сдвига θ . Максимумы импульсов тока реактора и амплитуды первой его гармоники ограничиваются. В результате происходит возрастание тока конденсаторной фазы.

Максимальному току главной фазы удовлетворяют соотношения

$$U_{б.э \min} = U_{d2} - kI_{г.ф \max}; \quad r_2 \gg x_{C2}; \quad \theta \approx 180^\circ,$$

соответствующие току конденсаторной фазы:

$$I_A = I_{к.ф} = I_{к.}$$

15. Техника безопасности при обслуживании конденсаторов

Использование конденсаторов в силовых электрических цепях, в частности, в схемах включения конденсаторного двигателя, связано с необходимостью проведения обязательных мер, обеспечивающих безопасность обслуживающего персонала.

Основной мерой обеспечения безопасности обслуживания является устройство ограждений, исключающих возможность случайного прикосновения к открытым токоведущим частям, находящимся под напряжением. Желательно иметь сетчатые ограждения. При отсутствии металлической сетки ограждения могут быть выполнены в виде кожуха из листовой стали.

Батарею статических конденсаторов необходимо надежно закрепить, чтобы предупредить смещение ее от возможных вибраций и сотрясений. Расположение батареи и устройство ограждений должны обеспечить удобный доступ к конденсаторам.

Замена неисправных плавких вставок предохранителей производится только при замкнутом рубильнике в цепи отключаемой емкости. Каждый раз после выключения двигателя следует замыкать цепь с отключаемой (пусковой) емкостью, тем самым подготавливая схему к очередному пуску.

Необходимо иметь в виду, что конденсатор с исправной изоляцией после отключения сохраняет напряжение на выводах в течение длительного времени. В наиболее неблагоприятном случае оно может достигать амплитуды напряжения переменного тока.

Опасность поражения электрическим током при прикосновении к заряженному конденсатору тем больше, чем больше его емкость и выше напряжение.

При производстве ремонтных работ и испытаниях после каждого отключения конденсатора производится его разряд. В качестве разрядного сопротивления проще всего использовать несколько электрических ламп накаливания, соединенных последовательно.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Адаменко А. И. Однофазные конденсаторные двигатели. — Киев: Изд-во АН УССР, 1960.
2. Долин П. А. Справочник по технике безопасности. 6-е изд., перераб. и доп. — М.: Энергоатомиздат, 1984.
3. Меркин Г. Б. Конденсаторные электродвигатели для промышленности и транспорта. — М. — Л.: Энергия, 1966.
4. Полупроводниковые приборы: Диоды, тиристоры, оптоэлектронные приборы. Справочник. Под общ. ред. Н. Н. Горюнова. — М.: Энергоиздат, 1982.
5. Сырых И. Н. Эксплуатация сельских электроустановок. — М.: Агропромиздат, 1986.

Содержание

Предисловие	3
1. Асинхронный двигатель трехфазного тока. Основные технические данные	4
2. Работа трехфазного асинхронного двигателя от сети однофазного тока. Способы пуска	12
3. Конденсаторный двигатель	17
4. Конденсаторы	19
5. Электрические схемы конденсаторного двигателя	23
6. Определение рабочей и пусковой емкости	25
7. Напряжение на конденсаторе	28
8. Выбор схемы включения	30
9. Графическое изображение синусоидальных величин	36
10. Графики зависимостей токов и напряжений конденсаторного двигателя от нагрузки	39
11. Расчетное определение рабочей емкости	42
12. Конденсаторный двигатель как преобразователь числа фаз	45
13. Работа конденсаторного двигателя при условиях, отличающихся от номинальных	51
14. Улучшение эксплуатационных свойств конденсаторного двигателя	53
15. Техника безопасности при обслуживании конденсаторов	69
Список литературы	70